

FACULTÉ DE MÉDECINE DE PARIS

Année 1939

N°

THÈSE

POUR LE

DOCTORAT EN MÉDECINE

(Diplôme d'État)

PAR

Jean AUZELOUX

Né le 13 Juillet 1913 à Albussac (Corrèze)

Les conditions physiologiques de l'éclairage artificiel dans les ateliers

Président : TANON, Professeur

IMPRIMERIE ARTISTIQUE MODERNE
A. LAPIED

24 rue Monsieur-le-Prince VI.

1939

FACULTÉ DE MÉDECINE DE PARIS

Année 1939

N°

THÈSE

POUR LE

DOCTORAT EN MÉDECINE

(Diplôme d'État)

PAR

Jean AUZELOUX

Né le 13 Juillet 1913 à Albussac (Corrèze)

Les conditions physiologiques de l'éclairage artificiel dans les ateliers

Président : TANON, Professeur

IMPRIMERIE ARTISTIQUE MODERNE

A. LAPIED

24. rue Monsieur-le-Prince VI.

1939

I. — PROFESSEURS

Anatomie	MM.
Physiologie	ROUVIERE.
Physique médicale	Léon BINET.
Chimie médicale	STROHL.
Bactériologie	POLONOVSKI.
Parasitologie et histoire naturelle médicale	Robert DEBRE.
Pathologie et thérapeutique générale	BRUMPT.
Pathologie médicale	BAUDOUIN.
Pathologie chirurgicale	ABRAMI.
Anatomie pathologique	MONDOR.
Histologie	LEROUX.
Pharmacologie et matière médicale	CHAMPY.
Thérapeutique	TIFFENEAU.
Hygiène et médecine préventive	HARVIER.
Médecine légale	TANON.
Histoire de la médecine et de la chirurgie	BALTHAZARD.
Pathologie expérimentale et comparée	LAIGNEL-LAVASTINE.
Hydrologie thérapeutique et climatologie	FIESSINGER.
	CHIRAY.
	LOEPER.
	CARNOT.
Clinique médicale	CLERC.
	Marcel LABBE.
Hygiène et clinique de la première enfance	LEREBoullet.
Clinique des maladies des enfants	NOBECOURT.
Clinique des maladies mentales et des maladies de l'encéphale	H. CLAUDE.
Clinique des maladies cutanées et syphilitiques	GOUGEROT.
Clinique des maladies du système nerveux	GUILLAIN.
Clinique des maladies infectieuses	LEMIERRE.
	CUNEO.
	GOSSET.
Clinique chirurgicale	GREGOIRE.
	LENORMANT.
Clinique ophtalmologique	TERRIEN.
Clinique urologique	CHEVASSU.
	COUVELAIRE.
Clinique d'accouchements	JEANNIN.
	LEVY-SOLAL.
Clinique gynécologique	MOCQUOT.
Clinique chirurgicale infantile et orthopédie	OMBREDANNE.
Clinique thérapeutique médicale	RATHERY.
Clinique oto-rhino-laryngologique	LEMAITRE.
Clinique thérapeutique chirurgicale	Pierre DUVAL.
Clinique propédeutique	M. VILLARET.
Clinique de la Tuberculose	TROISIER.
Clinique chirurgicale orthopédique de l'adulte	MATHIEU.
Clinique cardiologie	LAUBRY.
Clinique de neuro-chirurgie	Clovis VINCENT.
Clinique d'Assistance Médico-sociale	N...
	HAZARD.
	HOVELACQUE.
Professeurs sans chaire	MULON.
	OLIVIER.
	SANNIE.
	VERNE.

II. AGRÉGÉS EN EXERCICE

MM.

AMELINE Pathologie chirurgicale.
 BARIETY Pathologie médicale.
 BENARD (H.) . Pathologie médicale.
 BERNARD (E.) . Pathologie médicale.
 BESANÇON (J.) Hydrologie.
 BOULIN Pathologie médicale.
 BULLIARD Histologie.
 CATHALA Pathologie médicale.
 CHEVALLIER .. Pathologie médicale.
 COSTE Pathologie médicale.
 DOGNON Physique.
 FEY Urologie.
 FUNCK Pathologie chirurgicale.
 GALLIARD Parasitologie.
 GASTINEL Bactériologie.
 DE GAUDART
 D'ALLAINES Pathologie chirurgicale.
 GAYET Physiologie.
 DE GENNES ... Pathologie médicale.
 GIROUD Histologie.
 HAGUENAU .. Pathologie médicale.
 HALPHEN Oto-rhino-laryngologie.
 HUGUENIN ... Anatomie pathologique.
 JOANNON Hygiène.
 LACOMME Obstétrique.

MM.

LANTUEJOUL . Obstétrique.
 LAROCHE (Guy) Pathologie médicale.
 LAVIER Parasitologie.
 LELONG Pathologie médicale.
 LEMAIRE Pathologie expérimentale.
 LEVEUF Pathologie chirurgicale
 Mlle J. LEVY .. Pharmacologie.
 LEVY-VALENSI. Neurologie et Psychiatrie.
 MENEGAUX ... Pathologie chirurgicale.
 MOLLARET ... Pathologie médicale.
 MOREAU Pathologie médicale.
 MOULONGUET . Pathologie chirurgicale.
 MOUQUIN Pathologie médicale.
 PETIT-
 DUTAILLIS Pathologie chirurgicale.
 PIEDELIEVRE .. Médecine légale.
 PORTES Obstétrique.
 RENARD Ophtalmologie.
 RICHT Physiologie.
 SENEQUE Pathologie chirurgicale.
 TURPIN Pathologie médicale.
 VIGNES Obstétrique.
 WILMOTH Pathologie chirurgicale.

III. — AGRÉGÉS RAPPELÉS A L'EXERCICE pour le service des examens

MM.

ALGLAVE Pathologie chirurgicale.
 BUSQUET Pharmacologie.
 CHAILLEY-BERT Physiologie.
 GUENIOT Obstétrique.
 HEITZ-BOYER . Pathologie chirurgicale.

LARDENNOIS .. Pathologie chirurgicale.
 LE LORIER ... Obstétrique.
 NEVEU-LEMAIRE. Parasitologie.
 SCHWARTZ .. Pathologie chirurgicale.
 VAUDESCAL . Obstétrique.

IV. — AGREGES CHARGES DE COURS DE CLINIQUE ANNEXE

à titre permanent.

MM.		MM	
ALAJOUANINE .	} Clinique médicale.	BASSET	} Clinique chirurgicale..
AUBERTIN . . .		BROCQ	
BRULE		CADENAT	
CHABROL		GATELLIER. . .	
DONZELOT . . .		MOURE	
DUVOIR		QUENU	
LIAN		VELTER	
PASTEUR-VAL- LERY-RADOT			
SEZARY			

MM.

ECALLE	} Clinique obstétricale.
METZGER	

V. — CHARGÉS DE COURS

MM.

CHAILLEY-BERT, agrégé.	Education physique.
LEDoux-LEBARD	Radiologie clinique.
RUPPE	Stomatologie.
WEIL-HALLE	Puériculture.

Par délibération en date du 9 décembre 1798, l'Ecole a arrêté que les opinions émises dans les dissertations qui lui sont présentées, doivent être considérées comme propres à leurs auteurs et elle n'entend leur donner aucune approbation ni improbation.

A LA MEMOIRE DE MON PERE

A MA MERE

A MA SŒUR

A Monsieur le PROFESSEUR TANON

Professeur d'Hygiène à la Faculté de Médecine de Paris,
Directeur de l'Institut d'Hygiène de la Faculté
de Médecine de Paris,
Membre de l'Académie de Médecine,
Conseiller Technique Sanitaire au Ministère de
la Santé Publique,
Inspecteur Général des Services Techniques d'Hygiène
à la Préfecture de Police.
Officier de la Légion d'Honneur.

*Qui nous a fait le très grand honneur
d'accepter la présidence de cette thèse.*

A Monsieur le DOCTEUR EMILE HAAS,
Assistant au Laboratoire de Physique
de la Faculté de Médecine de Paris.

*Qui nous a inspiré le sujet de cette thèse
et nous a aidé de ses précieux conseils.
Qu'il trouve ici l'expression de
notre sincère reconnaissance.*

A MES PROFESSEURS

de l'Ecole de Médecine de Clermont-Ferrand.

A MES PROFESSEURS

de la Faculté de Médecine de Paris.

A MES MAITRES
dans les Hôpitaux.

A MES MAITRES
de l'Institut d'Hygiène.

INTRODUCTION

L'éclairage artificiel a pris dans la vie moderne une place considérable et sans cesse croissante. Actuellement, la tombée du jour n'arrête plus l'activité de nos grandes cités, et si l'on songe qu'un quart, environ, du travail annuel s'effectue à la lumière artificielle, on voit toute l'importance que présente un tel problème dans l'industrie.

Les progrès de la civilisation, notre goût du bien-être et du confort exigent un éclairage de plus en plus perfectionné, comportant le maximum de commodité. C'est ce qui explique l'immense succès de la lumière électrique, et l'on peut dire qu'aujourd'hui, à quelques exceptions près, c'est le seul mode d'éclairage employé.

Les commerçants, les premiers, ont su utiliser les ressources de l'éclairagisme moderne pour attirer l'attention des passants et mettre en valeur leur marchandise. C'est ainsi que des solutions intéressantes ont été fournies par certains grands magasins.

Dans l'industrie, l'évolution s'est faite beaucoup plus lentement. Alors que l'éclairage des vitrines et des magasins était fait par des spécialistes et fondé sur des principes rationnels, dans les usines, au contraire, pendant longtemps, l'empirisme seul a prévalu. Les installations étaient faites sans étude préalable suffisante, le choix des sources et leur emplacement trop souvent laissé au hasard.

Cependant aux Etats-Unis et en Angleterre, un important mouvement de propagande attira l'attention sur l'urgence du problème. Il insista sur la nécessité de

définir les conditions d'un minimum de fatigue oculaire et l'intérêt d'établir les règles d'un éclairage rationnel.

Sous cette influence, de vastes expériences furent entreprises par l'industrie étrangère. Le contrôle rigoureux auquel elles étaient soumises montra d'une façon indiscutable les heureux effets d'un bon éclairage : augmentation de la production, amélioration de la qualité des produits fabriqués, réduction des déchets, et enfin une diminution notable du nombre et de la gravité des accidents.

Les sanctions financières qui en découlent ne pouvaient pas laisser l'industriel indifférent. D'ailleurs, l'évolution sociale a fait que l'on exige maintenant un rendement intensif du personnel. Le travail, dans ces conditions, ne peut être prolongé, sans dommage pour la santé, que si toutes les règles de l'hygiène sont observées. Il n'est pas douteux qu'aujourd'hui, aucun ouvrier n'accepterait de travailler avec un éclairage tel qu'il existait il y a seulement vingt ans. Certes, on voit encore beaucoup d'ateliers dont l'éclairage est défectueux, mais la grande industrie a maintenant compris tout l'intérêt de la question. Le soin qu'elle apporte à l'étude des projets d'éclairage et l'importance du budget qu'elle y consacre en témoignent amplement. Nous pouvons donc penser que cette tendance va se généraliser et ne tardera pas à gagner les petites entreprises. Car un bon éclairage constitue une source de bénéfice pour l'employeur et, de plus, a l'avantage de placer les ouvriers dans de meilleures conditions d'hygiène et de sécurité.

En France ce sont des savants tels que Broca, Jouaust, Laporte, qui ont eu le mérite d'attirer les premiers l'attention sur ces questions.

Au début du siècle, Broca publiait une importante série de travaux d'optique physiologique : la sensation lumineuse en fonction du temps (1902); Vision des signaux colorés (1902); Visibilité des feux réglementaires de la marine (en collaboration avec Polack (1908); Etude des principales sources de lumière, au point de vue de l'hygiène de l'œil (en collaboration avec Laporte (1908).

A la suite de ces recherches, on vit se répandre un certain nombre de revues et de traités étrangers tels que : *The illuminating engineer*, Transactions of the illuminating engineering society, le livre de Gaster et Down : *Modern illuminants and illuminating engineering*, *Lichttechnik* de Bloch.

Signalons encore la participation Française aux congrès internationaux d'hygiène industrielle de Bruxelles (1910) et de Milan (1912) qui, en accordant une place importante à l'éclairage, créèrent une publicité intellectuelle en faveur de ces questions et leur conférèrent, en quelque sorte, un caractère officiel.

Après la guerre, les perfectionnements apportés à la fabrication des lampes donnèrent un nouvel essor à l'éclairage.

Les anciennes lampes à filament de carbone furent remplacées par des lampes à filament métallique, fonctionnant à des températures notablement plus élevées: (2.500°C au lieu de 1.900°C). On employa successivement l'osmium, le tantale, enfin le tungstène. L'introduction

d'un gaz inerte dans l'ampoule permit encore d'élever la température du filament (2.700° C) sans accélérer sa vaporisation. L'intensité et l'efficacité lumineuse des lampes se trouvèrent ainsi augmentées sans réduction de la durée d'utilisation.

Le commerce a donc fourni des sources lumineuses de plus en plus puissantes, de plus en plus économiques mais aussi de plus en plus éblouissantes. Pour éviter cet inconvénient, il fallut inventer des enveloppes diffusantes et des appareils divers destinés à diminuer l'éclat de la source et masquer le filament.

Dans la solution de ces problèmes, les ingénieurs ont été efficacement aidés, surtout pour la partie physique, par l'Institut d'Optique théorique et appliquée qui venait de se fonder sous la direction du professeur Ch. Fabry et qui depuis n'a pas cessé de s'intéresser à ces questions.

Par la suite, un certain nombre d'organismes se sont créés pour l'étude de l'éclairage. La Société pour le Perfectionnement de l'Eclairage, subventionnée par l'Industrie électrique s'occupe d'étude et de propagande. Les brochures qu'elle édite constituent une littérature importante et constamment remise à jour. La deuxième Section de la Société Française des Electriciens consacre son activité à l'étude de la lumière et des diverses radiations. Certains fabricants de lampes et d'appareils ont créé des bureaux d'étude destinés à établir des projets et à répandre les principes de l'éclairage. Enfin, une exposition annuelle au Salon de la Lumière fait connaître au public les derniers perfectionnements réalisés dans tous les domaines de la lumière. Toutes les

recherches sont centralisées par le Comité Français de l'Eclairage et du Chauffage affilié à la Commission internationale de l'Eclairage.

Depuis quelques années, des chaires d'éclairage ont été créées dans l'enseignement supérieur. C'est ainsi que l'éclairage fait l'objet de cours spéciaux dans certaines grandes écoles, telles que : l'Institut d'Optique, l'Ecole Supérieure d'Electricité, l'Ecole des Travaux Publics, l'Ecole des Beaux-Arts (section architecture), l'Institut de Technique sanitaire et l'Institut d'Hygiène Industrielle.

Les efforts accomplis par tous ces organismes sont considérables et ont abouti à des résultats intéressants. Cependant, il est regrettable que dans une question qui touche de si près la physiologie et la pathologie de l'œil, la participation des médecins n'ait pas été plus importante. B. Gros dans sa thèse sur l'Eblouissement rétinien s'exprime ainsi :

« On peut reprocher à tous ces travaux d'avoir, en général, été faits par des personnes étrangères à la médecine et à la physiologie. Il n'en résulte pas qu'ils soient inféconds, au contraire. Certaines découvertes d'optique physiologique ont été faites par des Industriels ou par des physiciens, précisément parce qu'ils avaient besoin de certaines notions et qu'ils se sont arrangés comme ils ont pu, avec des ressources d'ailleurs supérieures à celles de nos laboratoires, pour en établir les fondements. C'est ainsi que les valeurs de la fraction différentielle sont beaucoup mieux établies par les travaux quotidiens des photométristes que par les travaux des physiologistes purs.

« Mais on peut regretter que tous ces travaux de physiciens ou d'ingénieurs n'aient pas tenu un compte suffisant de l'organe de la vue, ni de son fonctionnement, de sorte que ces savants ont manqué de la méthode physiologique qui leur aurait permis d'aller encore plus vite et plus sûrement vers le but qu'ils se proposaient ».

L'éclairage pose, en effet, des problèmes variés qui intéressent des sciences totalement opposées exigeant des disciplines et des méthodes de travail très différentes.

Le but d'un bon éclairage étant d'assurer la meilleure vision avec le minimum de fatigue, il importe tout d'abord, par une analyse des fonctions élémentaires de l'œil, de déterminer les conditions que doit remplir la lumière qui impressionne la rétine. C'est là essentiellement un travail de physiologie ; c'est celui que nous aurons surtout en vue dans cette étude. Quant à la réalisation des conditions ainsi définies, elle fait intervenir des notions d'optique et de photométrie qui sont surtout du ressort du physicien et de l'ingénieur.

Nous ne voulons pas dire par là que les médecins et les ingénieurs doivent travailler indépendamment. Bien au contraire, une collaboration étroite nous paraît indispensable entre des gens qui étudient la même question. Aussi, dans cet esprit, avons-nous cru bon de faire précéder ce travail de quelques définitions de photométrie dont la connaissance est indispensable lorsqu'on veut consulter les ouvrages traitant de l'éclairage.

RAPPEL DE PHOTOMETRIE

Avant d'aborder l'étude des grandeurs photométriques, nous précisons la notion d'angle solide à laquelle nous ferons souvent appel dans ce qui va suivre.

ANGLE SOLIDE

Soit une aire S , à la surface d'une sphère de centre O . La demi-droite OX , mobile autour de O et se déplaçant sur le périmètre de S , décrit dans l'espace un angle solide Ω dont la valeur est donnée par le rapport de l'aire S au carré du rayon de la sphère.

$$\Omega = \frac{S}{r^2}$$

Remarque :

Nous aurons souvent à considérer des angles solides très petits. Dans ce cas particulier, l'aire sphérique S devient très petite par rapport au rayon. Nous pouvons donc admettre qu'elle est sensiblement égale à celle que découpe l'angle solide correspondant sur un plan perpendiculaire à sa direction moyenne et tangent à la sphère.

Si cette petite surface plane S' fait un angle α avec un plan perpendiculaire à la direction moyenne de l'angle, nous devons écrire :

$$\Omega = \frac{S'}{r^2} \cos \alpha$$

Unité :

L'unité d'angle solide est le steradian ; un steradian découpe sur une sphère de 1 mètre de rayon une surface de 1 mètre carré.

Nous voyons que la sphère entière est contenue dans un angle solide de 4π stéradians.

GRANDEURS PHOTOMETRIQUES :

Flux lumineux :

Si une source ponctiforme est située au centre d'une sphère creuse, la quantité de lumière que reçoit la surface de la sphère, pendant l'unité de temps, représente le flux lumineux total ou débit de la source.

En général, une source n'émet pas uniformément dans toutes les directions ; il en résulte qu'il peut y avoir de grosses différences entre les flux émis dans deux angles solides de même valeur. Or, il est très important de pouvoir caractériser le rayonnement d'une source dans les différentes directions de l'espace. Pour cela, on fait intervenir une autre grandeur, l'intensité lumineuse.

Intensité lumineuse :

Si l'on appelle dF le flux lumineux émis à l'intérieur d'un petit angle solide $d\Omega$, d'axe moyen OX , l'intensité lumineuse de la source, dans la direction OX , a pour valeur :

$$I = \frac{dF}{d\Omega}$$

ou plus exactement, la limite de ce rapport quand d Ω tend vers zéro.

Si, à partir de la source, on porte dans toutes les directions de l'espace, des vecteurs de longueur proportionnelle à l'intensité, le lieu géométrique de l'extrémité de ces vecteurs s'appelle surface caractéristique d'émission ou solide photométrique.

Lorsque la source possède un axe de révolution, comme c'est le cas général, il suffira de porter des vecteurs dans un demi-plan méridien ; on obtient ainsi la courbe polaire d'émission.

Dans la pratique de l'éclairage, on se borne souvent à caractériser une source par son intensité moyenne sphérique ou par son intensité hémisphérique inférieure.

L'intensité moyenne sphérique d'une source est l'intensité que devrait avoir une source théorique pour émettre le même flux total avec une intensité uniforme pour toutes les directions de l'espace.

L'intensité moyenne hémisphérique inférieure à la même définition, mais on ne considère que la région de l'espace située au-dessous du plan horizontal de la source.

Une source n'est jamais rigoureusement ponctuelle, elle doit nécessairement avoir une certaine surface. La notion de surface d'émission fait apparaître deux autres grandeurs photométriques qui lui sont liées : la fluxance et la brillance.

Fluxance :

La fluxance ou radiance d'une source est le flux émis par unité de surface de la source. Elle a pour

valeur le rapport :

$$R = \frac{F}{s} \quad \begin{array}{l} \text{(F, flux lumineux)} \\ \text{(s surface d'émission)} \end{array}$$

Brillance :

La brillance d'une source, dans une direction donnée, est le rapport de l'intensité de la source, dans cette direction, à l'aire apparente de la source.

Si la surface s qui émet est plane, et si elle forme un angle α avec le plan perpendiculaire à la direction considérée, la surface apparente est $s \cos \alpha$. Nous avons donc :

$$B = \frac{I}{s \cdot \cos \alpha}$$

Eclairement :

Lorsqu'un flux lumineux F tombe sur une surface S , l'éclairement moyen de cette surface a pour valeur :

$$E_m = \frac{F}{S}$$

Si le flux lumineux n'est pas uniforme, un point de la surface S pourra avoir un éclairement très différent de E_m . Mais, si la surface S prend des valeurs très petites, l'écart sera de plus en plus petit. La limite du rapport $dF : dS$, lorsque dS tend vers zéro, donne l'éclairement du point considéré.

$$E = \frac{dF}{dS}$$

L'éclairement peut s'écrire d'une autre façon si l'on exprime dF en fonction de l'intensité :

$$dF = I \cdot d\Omega = I \frac{dS}{r^2} \cos \alpha$$

nous avons donc :

$$E = \frac{I}{r^2} \cos \alpha$$

Cette dernière formule fait apparaître deux lois fondamentales :

1° L'éclairement varie en raison inverse du carré de la distance de la source au point considéré.

2° L'éclairement est proportionnel au cosinus de l'angle que fait le plan éclairé avec un plan perpendiculaire à la direction de la source vue du point considéré.

Toute surface éclairée, à moins d'être parfaitement noire, ce qui n'est jamais réalisé, émet de la lumière. Elle devient ainsi une source secondaire et à ce point de vue obéit aux mêmes lois que les sources primaires.

On appelle coefficient de diffusion d'une surface le rapport du flux diffusé au flux reçu.

$$K = \frac{F_d}{F_o} \quad \begin{array}{l} F_d \text{ flux diffusé} \\ F_o \text{ flux reçu} \end{array}$$

Ce coefficient est extrêmement variable suivant la nature de la surface. Nous donnons ici quelques nombres, empruntés à l'ouvrage de M. Darmois :

Peinture blanche (blanc de zinc)	K = 0,80
— jaune clair (chrome)	K = 0,65
— brune (ocre ou terre d'ombre)....	K = 0,40
Papiers peints blancs, brillants	K = 0,70
— — — mats	K = 0,57
— — vert olive	K = 0,20
— — bleu clair	K = 0,12
— — rouge foncé	K = 0,06

UNITES ET MESURES PHOTOMETRIQUES :

Unité d'intensité lumineuse :

Pour des raisons d'ordre pratique, c'est l'intensité lumineuse qui a servi de base au système d'unités photométriques.

L'unité d'intensité lumineuse ou bougie internationale est, en effet, la seule qui soit matérialisable par des étalons. Ces étalons sont constitués par des lampes électriques à filament de carbone, conservées en France par le Laboratoire Central de la Société des électriciens.

Il est indispensable que ces lampes aient une intensité bien définie dans une direction donnée. Pour réaliser cette condition, elles doivent fonctionner sous un régime constant, bien déterminé. De plus, leur filament est disposé dans un plan et c'est perpendiculairement à ce plan que se font les mesures.

Pour avoir une idée approximative de la grandeur de la bougie internationale, nous dirons que c'est à peu près l'intensité d'une bougie ordinaire en stéarine, dans le plan horizontal.

Mesures d'intensité lumineuse.

Les mesures d'intensité se font au moyen d'un photomètre. Le principe des photomètres est toujours le même (sauf pour quelques modèles un peu particuliers comme celui de Fabry et Buisson). On éclaire respectivement deux écrans identiques et contigus au moyen d'une source d'intensité connue et de la source dont on veut déterminer l'intensité. En déplaçant l'une des sources par rapport à l'écran, on peut réaliser l'égalité d'aspect des deux écrans. A ce moment, on a la relation :

$$\frac{I'}{I} = \frac{r'^2}{r^2}$$

d'où $I' = I \frac{r^2}{r'^2}$

Unité de flux lumineux :

L'unité de flux lumineux est le lumen. C'est le flux produit dans un angle solide de un stéradian par une source qui émet uniformément dans toutes les directions avec une intensité de une bougie internationale.

Une telle source donne donc un flux total de 4π , soit 12,56 lumens.

Mesures de flux lumineux.

Dans le cas général où la source n'émet pas uniformément, on peut obtenir le flux total de deux manières différentes :

1° Soit par le calcul à partir de la courbe polaire d'émission.

2° Soit par mesure directe au lumen-mètre.

Le lumen-mètre d'Ulbricht est une sphère creuse dont la paroi intérieure est recouverte d'un enduit blanc bien diffusant. La source à étudier est suspendue à l'intérieur de ce globe. Une fenêtre, ménagée dans la paroi, porte une lame de verre dépoli dont on mesure l'éclairement. Cet éclairement est proportionnel au flux de la source, à condition d'éviter par un dispositif spécial l'éclairage direct du verre dépoli par la source.

Ces mesures sont surtout utiles aux ingénieurs pour apprécier le rendement économique de divers appareils tels que les réflecteurs et les globes diffusants.

Unité d'éclairement :

En partant des formules :

$$E = \frac{F}{S} \quad \text{et} \quad E = \frac{I}{r^2}$$

nous dirons que l'unité d'éclairement nommée lux, est l'éclairement produit par un flux uniforme de un lumen, tombant sur une surface de un mètre carré, ou bien encore, que c'est l'éclairement produit sur un écran par une source de une bougie, située à un mètre.

Une autre unité 10.000 fois plus grande est le phot, c'est le lumen par centimètre carré.

Mesures d'éclairément.

Le procédé le plus commode pour apprécier l'éclairage d'un local consiste à prendre des mesures d'éclairément sur les différents plans (murs, planchers, établis, machines, etc.). Dans ce but, on utilise des appareils nommés luxmètres. Nous donnons sommairement le principe des modèles les plus courants dont on peut avoir à se servir.

L'un d'eux se compose d'une boîte rectangulaire divisée par une cloison en deux compartiments très inégaux. Le plus grand contient une pile sèche, un rhéostat et un voltmètre. Le deuxième constitue le luxmètre proprement dit. Il a la forme d'un prisme très allongé, à section carrée. A l'une de ses extrémités, se trouve une petite lampe masquée par une plaque de verre diffusant.

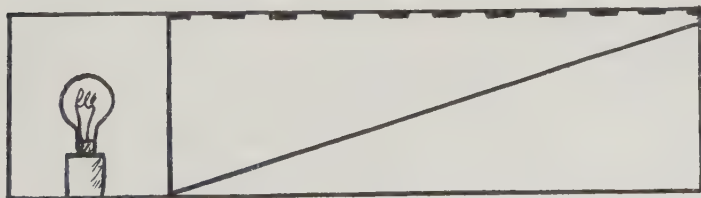


fig. 1

Du bord inférieur de cette plaque, part un plan incliné, peint en blanc mat, qui atteint l'extrémité opposée de luxmètre au voisinage de son bord supérieur. La paroi supérieure du prisme est percée d'une rangée de fenêtres circulaires, recouvertes de papier translucide.

Lorsque la lampe est allumée, on a une série de plages lumineuses dont la brillance va en diminuant, à mesure que l'on s'éloigne de la source. Celles qui sont

éclairées plus fortement par leur face inférieure que par leur face supérieure paraissent lumineuses ; celles qui sont moins éclairées par leur face inférieure que par leur face supérieure paraissent sombres ; enfin, celle qui a le même éclairement sur ses deux faces est à peine visible et se confond avec son entourage.

Pour faire une mesure d'éclairement, on commence par régler le courant débité par la pile au moyen d'un rhéostat. Un voltmètre, relié aux bornes de la lampe, porte sur son cadran un repère qui indique la tension à atteindre. Lorsque le réglage est effectué, il ne reste plus qu'à placer le luxmètre sur la surface dont on veut mesurer l'éclairement ; on cherche la tâche la moins apparente, et on lit la graduation située en regard. On obtient ainsi, en lux, la valeur de l'éclairement au point considéré.

Un autre type de luxmètres également très employés repose sur le même principe. Dans ces appareils, il n'y a qu'une seule tache sur l'écran, mais la lampe étalon peut être, à volonté, rapprochée ou éloignée de cet écran. Un index solidaire du chariot porte-lampe se déplace sur une échelle graduée, située à l'extérieur.

Comme dans les appareils précédents, on commence par régler le courant d'alimentation sous le contrôle du voltmètre. Puis, au moyen d'une vis sans fin, on déplace le chariot porte-lampe de façon que la tache translucide soit aussi peu visible que possible. Lorsque ce résultat est obtenu, on note la division en face de laquelle se trouve le curseur, le chiffre correspondant donne la valeur de l'éclairement cherché.

Ces appareils sont très suffisants pour les besoins de la pratique courante. Cependant, pour prendre un grand nombre de mesures, ils demandent beaucoup de temps et une certaine habitude de la photométrie. Avec les meilleurs opérateurs l'erreur n'est jamais inférieure à : $1/20^e$.

En outre, les lampes étalons et les piles doivent être fréquemment vérifiées et remplacées.

Les nouveaux luxmètres à cellule photoélectrique sont basés sur un principe tout à fait différent. Ils se composent essentiellement d'une ou plusieurs cellules photoélectriques reliées à un microampèremètre de faible résistance interne, gradué directement en lux. En général, le cadran porte deux ou trois graduations ; une clé de shunt permet de passer immédiatement d'une échelle à l'autre, ce qui étend considérablement la gamme des sensibilités (0 à 5.000 lux).

L'erreur provenant de l'appréciation de l'opérateur se trouve ainsi éliminée, puisque l'éclairement est directement donné par la déviation d'une aiguille sur un cadran gradué en lux.

En réalité, la précision de ces appareils est moins bonne qu'on pourrait le supposer au premier abord. Un luxmètre est destiné à mesurer non pas une caractéristique physique d'un rayonnement, mais une caractéristique physiologique qui dépend de la visibilité du rayonnement. Un bon luxmètre à cellule photoélectrique devrait donc avoir la même courbe de sensibilité que l'œil pour les diverses radiations du spectre. Pratiquement, cette condition n'est pas réalisable, et, lorsque la composition spectrale du rayonnement change, la sen-

sibilité globale de la cellule photoélectrique peut s'écarter notablement de celle de l'œil. Il en résulte qu'en définitive, la précision des luxmètres à cellule n'est pas supérieure à celle d'un bon luxmètre visuel entre les mains d'un opérateur expérimenté.

Ces appareils présentent cependant des avantages notables. Ils ne comportent pas de pile, ni de lampe, et, par conséquent, ne nécessitent aucun entretien ni aucun réglage. Les constructeurs ont réalisé des modèles réduits facilement transportables et d'un maniement extrêmement simple qui permettent à des personnes non entraînées, de relever très rapidement un grand nombre de mesures avec une précision qu'il est difficile de dépasser avec d'autres appareils.

Unité de fluxance :

La fluxance s'exprime par le rapport de la surface émetrice aux flux émis.

L'unité de fluxance n'a pas reçu de nom spécial, c'est le lumen par centimètre carré ou par mètre carré.

Comme l'a fait remarquer Ch. Fabry, il s'agit d'unités de même ordre que les unités d'éclairement, la seule différence étant que dans un cas le flux est émis et que dans l'autre il est reçu. Aussi a-t-on pris l'habitude d'exprimer les éclairagements en lux, et de réserver le terme de phot pour les fluxances à cause de leur valeur généralement très élevée.

Unité de Brillance :

L'unité de brillance est le Stilb, c'est la brillance d'une source ayant une intensité de une bougie par centimètre carré de surface apparente.

La notion de brillance est très importante en physiologie. Si l'on consulte des ouvrages de physiiciens comme l'Introduction à l'étude de la photométrie ou les leçons de photométrie de Ch. Fabry, on voit que seule la brillance est considérée comme caractéristique de l'aspect visuel des objets situés dans le champ. Par contre, en médecine, pendant longtemps, les études de physiologie de la vision ont été faites en fonction de l'éclairement. Comme les coefficients de diffusion sont très variables, il en résultait une grande imprécision dans l'interprétation des résultats. Aussi faut-il être reconnaissants à MM. Haas et Couvreur d'avoir, pour la première fois, dans leur travail sur l'acuité visuelle aux basses lumières (1927), proposé aux physiologistes et aux oculistes de mettre désormais leur langage en harmonie avec celui des physiiciens.

L'échelle des brillances perceptibles est très étendue, l'œil peut en effet discerner des brillances de l'ordre de 10^{-10} stilbs et il est capable de supporter, pendant un temps très court il est vrai, l'éclat du soleil. Cependant, lorsque l'observation doit être prolongée, il ne faut pas dépasser des brillances de une demie bougie par centimètre carré, sous peine de voir rapidement apparaître des phénomènes de fatigue. En matière d'éclairage, il est même préférable de ne pas atteindre un tiers de bougie par centimètre carré.

Voici, d'après les ouvrages de Ch. Fabry et de Darmon, la brillance moyenne des principales sources :

bougie de stéarine	0,5 stilbs
bec Auer droit	3 à 5 —
bec Auer renversé	5 —

flamme de l'acétylène	8	—
filament de carbone incandescent ..	80	—
filament de lampes monowatt	150	—
filament des lampes 1/2 watt	1.000	—
cratère de l'arc électrique	15.000	—
surface du soleil à travers l'atmosphère de la terre	147.000	—

LOI DE LAMBERT

On dit qu'une source émet suivant la loi de Lambert, lorsque sa brillance est la même dans toutes les directions.

Cette loi est très importante à connaître, car, en pratique, nous pouvons admettre que toutes les sources, primaires ou secondaires, obéissent à cette loi.

Examinons le cas d'une source plane, et considérons un élément de surface S.

L'intensité lumineuse, dans une direction faisant un angle θ avec la normale, a une valeur donnée par la formule :

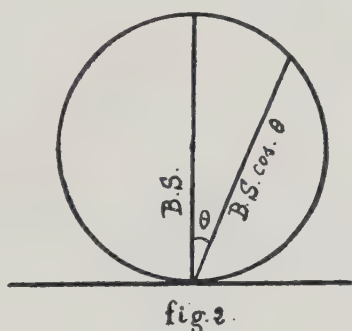
$$B = \frac{I}{S \cdot \cos \theta}$$

d'où l'on tire :

$$I = B \cdot S \cdot \cos \theta.$$

Comme B a une valeur constante pour toutes les directions de l'espace, I ne dépend que d'une seule variable : $\cos \theta$. Si, dans le plan de la figure, on représente l'intensité par des vecteurs ayant des longueurs pro-

portionnelles à $B. S. \cos \theta$, le lieu géométrique de leur extrémité est un cercle. Dans l'espace, la surface caractéristique d'émission de la source est une sphère, tangente à la source et de diamètre $B. S.$



Le calcul montre que le flux total émis par cette source est :

$$F = \pi B. S.$$

RELATION ENTRE LA BRILLANCE ET L'ECLAIREMENT :

Si l'on a un diffuseur parfait, c'est-à-dire dont le flux émis est égal au flux reçu, on peut écrire :

$$F = \frac{E}{S} = \pi B.$$

$$B = \frac{E}{\pi}$$

Lorsqu'on veut obtenir la brillance en stilbs, il faut exprimer l'éclairement en phots ; si l'on employait le lux comme unité, il faudrait diviser les résultats par 10.000.

Dans le cas général où le diffuseur absorbe une fraction du flux reçu, on a :

$$B = \frac{E}{\pi} K \quad (K \text{ coefficient de diffusion})$$

Dans les conditions habituelles de l'éclairage artificiel, les meilleurs éclairagements dépassent rarement 200 lux. La formule précédente montre que les brillances des surfaces ainsi éclairées ne risquent pas de devenir dangereuses pour l'œil. Avec les surfaces diffusant le mieux la lumière, il faudrait des éclairagements de l'ordre de 15 à 20.000 lux pour atteindre une brillance de un demi stilb. De telles conditions ne sont généralement réalisées que par l'éclairage naturel. A l'ombre, l'éclairement donné par un ciel clair et lumineux est compris entre 10.000 et 20.000 lux ; en été, à midi, l'éclairement d'une surface exposée au soleil peut atteindre 100.000 lux. On conçoit ici la nécessité de protéger les yeux lorsqu'on doit contempler des surfaces bien diffusantes comme une route poudreuse, une vaste étendue de sable ou de neige. L'ophtalmie des neiges due à l'excès des brillances dans le champ visuel est un accident bien connu des alpinistes.

LES SENSIBILITES ELEMENTAIRES

DE LA RETINE

Nous distinguerons deux groupes de fonctions rétiennes ; dans le premier, nous rangerons les sensibilités élémentaires : sens lumineux brut, sens différentiel et sens des formes. Le second groupe sera constitué par les divers mécanismes qui font varier ces sensibilités et leur permettent de s'adapter à l'excitant.

On trouve d'abondants développements sur ces questions dans tous les traités de physiologie. Notre intention n'est pas de les reproduire ici ; nous nous bornerons simplement à rappeler les principaux résultats en insistant toutefois sur certains points qui sont plus directement en rapport avec le sujet qui nous intéresse.

I. — LE SENS LUMINEUX BRUT.

C'est la possibilité de percevoir l'existence de la lumière, indépendamment de toutes notions de forme ou de couleur.

Les premiers essais de mesure du seuil lumineux ont été faits par Aubert. Il a trouvé que le minimum discernable est la brillance d'une feuille de papier blanc, éclairée par une bougie placée à une distance de 200 à 250 mètres.

Actuellement, nous disposons d'appareils perfectionnés qui permettent de faire des mesures très précises. Le plus connu est le photoptomètre de Charpentier. Il se compose de deux écrans translucides conjugués

par un système de 2 lentilles très rapprochées. L'un des deux écrans est éclairé par une source placée en arrière de lui et son image est reçue par l'autre écran. On règle la brillance de ce dernier écran en manœuvrant la vis d'un « œil de chat » situé entre les deux lentilles.

Cet appareil donne des brillances très uniformes que l'on peut faire varier progressivement depuis zéro jusqu'à une valeur suffisante pour la détermination du seuil. Malheureusement sa graduation en brillance est assez difficile.

Le Docteur Emile Haas a imaginé un photoptomètre qui permet une graduation de la lumière par un procédé optico-mécanique extrêmement précis. Voici, d'après M. Haas, la description de l'appareil :

« En principe, le dispositif comprend les éléments suivants, dans l'ordre : une lampe à filament rectiligne vertical, une première lentille, une fente horizontale réglable, une seconde lentille, une plaque d'opaline constituant le fond des tests.

La première lentille conjugue le plan de la fente au plan du filament et la seconde conjugue celle des faces de la première lentille tournée vers la lumière au plan de l'opaline.

Pourvu que l'on ait respecté, dans la construction, certaines conditions de diaphragmes, et que l'on n'utilise que les parties du filament qui sont à la même température (ce qui est réalisé automatiquement, par construction), le système jouit des trois propriétés désirées : 1° l'éclairement et par conséquent la brillance de l'opaline sont constamment uniformes ; 2° ces qualités sont proportionnelles, à tout moment, à la longueur de fila-

ment utilisée, c'est-à-dire à la longueur de la fente, ou à des tours de vis ; 3° la couleur de la lumière est invariable.

La fente est à écartement symétrique, grâce à une vis robuste à filets droit et gauche. Cette vis est commandée par un tambour gradué dont chaque division correspond à une brillance de 2 dix millionièmes de stilb ».

Une simple lecture sur le tambour donnera donc, à chaque instant, la valeur de la brillance de la plage lumineuse. Cet appareil a surtout été construit pour l'étude de l'acuité visuelle aux basses lumières. Il peut également être utilisé pour les déterminations de seuil lumineux, mais les variations de brillance sont, au départ, un peu trop rapides ; à ce point de vue, le photop-tomètre de Charpentier est beaucoup plus souple et demeure l'appareil de choix.

Lorsqu'on fait des mesures de seuil, on constate qu'il est très fortement influencé par les circonstances de l'expérience.

a) Le seuil varie en fonction de l'adaptation. Chacun a pu constater que, lorsqu'on passe du grand jour dans une pièce obscure, tout d'abord on a une sensation de noir absolu, mais au bout de quelque temps, la vision s'améliore et on arrive à distinguer progressivement tous les objets environnants.

Ce phénomène a d'abord été étudié par Aubert. Il a été ensuite repris par Charpentier qui a cherché à établir la loi de variation du seuil lumineux, en fonction de l'éclairage ambiant.

Charpentier plaçait le sujet en expérience devant une plage dont il pouvait faire varier l'éclairement. Puis, après trois minutes d'adaptation, il déterminait rapidement le seuil lumineux au moyen de son photopomètre. Il a pu ainsi tracer une courbe donnant les variations de la sensibilité lumineuse en fonction de l'éclairement auquel l'œil est adapté. Cette courbe montre que, pour les faibles valeurs de l'éclairement, la sensibilité lumineuse est très élevée. Elle décroît d'abord très vite, puis, à mesure que l'éclairement augmente, les variations deviennent de plus en plus faibles.

Dans une autre série d'expériences, Charpentier a étudié la variation du seuil lumineux en fonction du temps de séjour dans l'obscurité totale. Là encore, il a trouvé une courbe à allure hyperbolique. Dans les premières minutes, le seuil décroît très vite, au bout de deux minutes il a le $\frac{1}{5}$ de sa valeur initiale, au bout de dix minutes le $\frac{1}{60}$, mais, après un séjour de vingt minutes à l'obscurité, le seuil ne diminue plus que d'une façon insensible.

Ces dernières expériences sont moins intéressantes pour nous que les variations du seuil en fonction de l'adaptation à la brillance de champ. Malheureusement, Charpentier n'avait pas choisi des unités fixes. Il utilisait l'éclairage du jour donnant sur une surface uniforme et qu'il modifiait par une série de verres absorbants gradués. Il avait soin de ne procéder que par des ciels très purs, de ne pas trop prolonger l'expérience et de ne comparer entre elles que les mesures d'une même expérience. Grâce à ces précautions, les courbes qu'il a obtenues nous renseignent bien sur les variations qualita-

tives du phénomène, mais il est regrettable de n'avoir aucune donnée sur la valeur absolue des variables.

b) Charpentier a également montré que le seuil est indépendant de la surface de la plage lumineuse, si toutefois celle-ci est vue sous un diamètre apparent supérieur à $1/100^e$. Au-dessous de $1/100^e$, le seuil est inversement proportionnel à la surface de la plage lumineuse et au carré de la distance de cette plage à l'œil de l'observateur.

c) Lorsqu'on opère en lumière colorée, on a d'abord un seuil de sensation incolore ; il faut augmenter la brillance pour avoir le seuil chromatique.

Le rapport entre les deux seuils se nomme intervalle photochromatique. Cet intervalle varie énormément avec la longueur d'onde de la lumière employée ; il ne dépend pas de l'adaptation ni des individus. Pour le rouge, il est très faible, pour le bleu, au contraire, il est très élevé. Il faut 625 fois plus de lumière pour avoir la sensation bleu que pour avoir la sensation lumière.

Pour tous les travaux où intervient la vision chromatique (réassortiment, triage des soies, laines, etc...), il est indispensable d'avoir, non seulement une lumière dont la composition spectrale se rapproche de celle du soleil, mais encore de réaliser des éclaircissements très élevés du plan de travail.

d) Toutes les régions de la rétine n'ont pas la même sensibilité. La périmacula, en particulier, est plus sensible à la lumière que la macula. Ce fait était déjà connu des anciens astrologues qui avaient remarqué qu'une étoile à la limite cesse d'être visible lorsqu'on la fixe.

II. — SENSIBILITE DIFFERENTIELLE

La sensibilité différentielle nous renseigne sur les différences de brillance des objets extérieurs. Elle a pour mesure l'inverse de la fraction dite différentielle ou fraction de Fechner qui exprime, en fonction de la brillance d'une première plage, la plus petite augmentation de brillance nécessaire pour qu'une seconde plage, contiguë à la première, soit perçue différemment. Si B est la brillance de la première, la seconde doit avoir une brillance de $B + d B$. Le rapport $dB : B$ est la fraction différentielle.

Pour déterminer ce rapport, Fechner utilisait l'expérience suivante qui avait déjà été indiquée par Bouguer et par Lambert.

A une certaine distance d'un écran, on dispose deux bougies allumées. Entre l'écran et les bougies se trouve une baguette verticale qui forme deux ombres. La première ombre ne reçoit la lumière que de l'une des deux bougies, la deuxième ombre ne reçoit la lumière que de l'autre bougie. Le reste de l'écran est éclairé par la lumière des deux bougies. En éloignant l'une des bougies de l'écran, l'ombre correspondante s'affaiblit, puis elle disparaît lorsque les distances des bougies à l'écran sont entre elles à peu près comme un est à dix.

En admettant que les bougies aient la même intensité, et en appliquant la loi de l'inverse du carré des distances, on conclut que la plus petite différence perceptible est d'environ $1/100^e$ de l'éclairement initial.

Helmholtz a vu que la fraction différentielle varie avec les brillances. Elle est très élevée pour les faibles

lumières, elle passerait par un minimum pour un éclairage de 10 lux sur papier blanc (0,0003 bougies par cm. carré), pour croître à nouveau, mais d'une façon très lente, pour les brillances plus élevées.

Des travaux postérieurs de Kœnig et de Brodhun semblent montrer que la sensibilité différentielle continue à croître bien au-delà d'un éclairage de 10 lux sur papier blanc. Ces auteurs situent le maximum à 200 lux, ensuite la courbe deviendrait stationnaire pour diminuer seulement à partir d'éclairages très intenses, de l'ordre de 20.000 lux, entraînant une souffrance de la rétine.

On peut donc dire que, dans les conditions habituelles de l'éclairage artificiel, toute augmentation de l'éclairage entraînera une amélioration du sens différentiel.

Le sens différentiel joue un rôle important dans l'appréciation du relief, car ce sont les différences d'ombre qui contribuent, pour une large part, à nous renseigner sur la forme des objets extérieurs.

III. — SENS DES FORMES OU ACUITE VISUELLE

L'acuité visuelle est le pouvoir séparateur de la rétine, c'est-à-dire la qualité que possède la rétine de pouvoir percevoir comme séparées les sensations produites par deux points lumineux.

Lorsque l'angle sous lequel on voit ces deux points diminue, il arrive un moment où l'on n'a plus qu'une sensation unique. L'inverse de cet angle, dit angle limite, donne la valeur de l'acuité.

On a choisi comme unité d'acuité, celle qui correspond à un angle limite de une minute (1,5 mm. vu à une distance de 5 m.), c'est à peu près l'acuité de l'œil normal, placé dans les conditions habituelles.

En ophtalmologie, les mesures d'acuité se font à l'aide d'échelles (optotypes) comportant des caractères typographiques noirs sur fond blanc dont les interjambages sont vus, à la distance de l'examen, sous un angle donné.

Il est bien évident que ces mesures n'auront un sens que si l'œil ne présente aucun trouble de la réfraction ou si ces troubles sont compensés par un verre correcteur approprié.

a) *Variation de l'acuité avec la brillance du fond.*

Les expériences effectuées au Laboratoire central d'Electricité par A. Broca, Laporte et Jouaust ont montré que l'acuité augmente rapidement jusqu'à un éclaircissement du test voisin de 10 lux (3 dix millièmes de stilb) et qu'en suite, pour les valeurs plus élevées de l'éclaircissement, les variations de l'acuité deviennent vite négligeables.

Ces expériences faisaient partie d'une étude où les auteurs ont cherché à réunir des documents relatifs à l'utilisation par l'œil de la lumière émise par les sources usuelles de leur époque. Cela explique que les brillances de fond qu'ils ont utilisées ont rarement dépassé deux millièmes de stilb.

L'emploi des sources très puissantes, dont on dispose actuellement, exige que l'on ait des renseignements

correspondant à des brillances beaucoup plus élevées. Druault a vu que l'acuité continue à croître lentement, mais d'une façon notable, pour les éclairéments supérieurs à 10 lux. Il a trouvé une acuité égale à 1 pour un éclairément de 1,5 lux, à 1,25 pour un éclairément de 16,7 lux et à 1,50 pour un éclairément de 5.400 lux. D'autres expériences ont confirmé ces résultats.

Lorsqu'on trace la courbe de variation de l'acuité en fonction de la brillance du test on voit qu'elle croît asymptotiquement vers une certaine limite, voisine de 1,8.

b) Variation de l'acuité dans le champ visuel.

En dehors de la fovea, l'acuité visuelle baisse extrêmement vite. Il n'y a que la fovea qui permette une vision nette. La périphérie de la rétine nous renseigne seulement sur la présence des gros objets, pour voir leurs détails il est indispensable de les fixer.

c) Variation de l'acuité avec la couleur.

Ce sont les radiations allant du vert au rouge qui donnent la meilleure acuité, celles qui vont du vert au violet ont un éclat lumineux élevé mais donnent une moins bonne acuité (Macé de Lépinay et Nicati). Toutes ces déterminations manquent d'ailleurs de précision car elles doivent être faites à brillance égale des couleurs considérées, ce qui fait intervenir des comparaisons photométriques hétérochromes dont la valeur est contestée par beaucoup d'auteurs.

Il semble bien cependant qu'il y ait un maximum d'acuité pour les radiations voisines de 0,55 micron (jaune - vert) qui correspondent aussi au coefficient de luminosité le plus élevé. Il est intéressant de noter que la courbe spectrale d'intensité énergétique de la lumière solaire présente également un maximum à 0,55 micron. Beaucoup d'auteurs voient dans cette concordance un phénomène d'adaptation de l'œil pour une utilisation optima de la lumière solaire.

Ce court aperçu sur la sensibilité rétinienne montre qu'il s'agit d'un phénomène extrêmement complexe et que la séparation des trois fonctions élémentaires est en réalité un peu artificielle. Il est aisé de voir, en effet, qu'il n'y a pas indépendance complète entre les diverses fonctions ; en particulier le sens des formes n'existerait pas sans le sens lumineux et le sens différentiel. Cette distinction présente cependant de l'intérêt, car chacune des fonctions possède un caractère qui lui est propre et qui de plus est susceptible d'être mesuré.

HISTOPHYSIOLOGIE DE LA RETINE

L'ADAPTATION

Nous avons vu que le sens lumineux, le sens différentiel et le sens des formes n'ont pas des valeurs fixes. Ils varient en effet, dans de grandes limites, suivant la région du champ que l'on explore et suivant les conditions d'éclairage au moment de l'examen et dans les instants qui l'ont précédé.

L'ensemble des processus qui provoquent ces variations constitue le deuxième groupe des fonctions élémentaires de la rétine. Ce sont des fonctions de régulation qui tendent, à chaque instant, à proportionner les différentes sensibilités à la grandeur de l'excitant. Pour chaque valeur de celui-ci, il s'établit un état particulier de sensibilité qui constitue l'adaptation.

L'adaptation étant ainsi définie, précisons tout de suite que l'on ne peut y rattacher la constriction pupillaire. Ce phénomène, sur lequel nous reviendrons, est un réflexe de défense qui diminue la valeur des excitations, à la manière d'un diaphragme de limitation, mais ne modifie nullement la sensibilité de l'œil. En aucune manière, il ne saurait expliquer les variations de l'acuité visuelle ni du sens différentiel. Il n'explique pas non plus les variations du sens lumineux car celles-ci, au contraire des réflexes pupillaires, se font d'une manière lente et avec un retard considérable sur les modifications de l'excitant.

Comme la rétine est la seule membrane de l'œil qui soit sensible à la lumière, c'est à elle uniquement que

nous devons rapporter tous les phénomènes d'adaptation et de variation de sensibilité dans le champ. Nous dirons donc que la sensibilité de la rétine n'a pas une valeur uniforme pour toute la surface de cette membrane et que, pour une région déterminée, la sensibilité varie avec les conditions d'examen.

Voyons comment l'histo-physiologie va nous permettre d'expliquer ces phénomènes en pénétrant dans l'intimité de leurs mécanismes.

Les remarquables travaux de Ramon Y. Cajal nous ont appris que la rétine est essentiellement constituée par la superposition de trois couches d'éléments :

1° La couche des cellules sensorielles (cônes et bâtonnets),

2° La couche des neurones bipolaires,

3° La couche des neurones ganglionnaires dont les prolongements constituent les fibres du nerf optique.

C'est l'étude des articulations de ces différentes cellules qui va nous donner l'explication des variations de sensibilité dans l'espace.

Si nous consultons le précis d'histologie physiologique de Policard, nous lisons :

« Au niveau de la macula, région de grande visibilité, à chaque cône correspond une seule cellule bipolaire, une seule cellule ganglionnaire et, par conséquent, une seule fibre nerveuse optique. Il y a donc conservation de l'individualité de l'excitation nerveuse du cône au cerveau ».

Pour que deux points lumineux apparaissent distincts, il suffit donc que leurs images rétinienne soient séparées par un cône, au moins, non impressionné. C'est

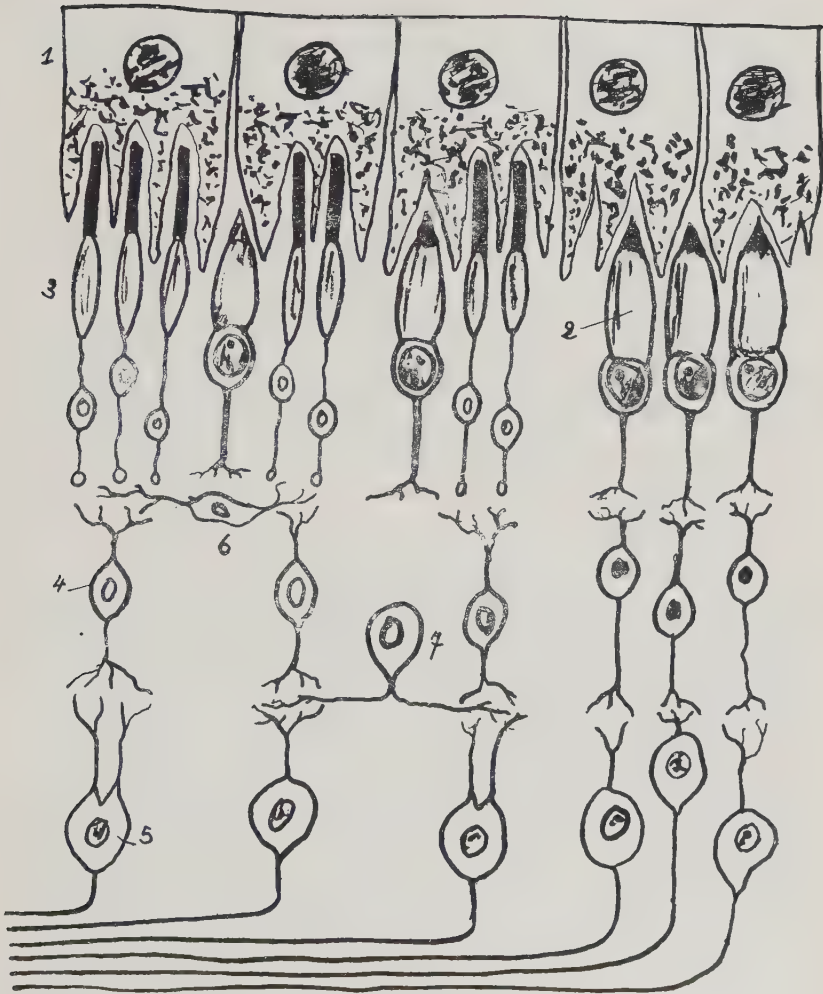


fig. 3

STRUCTURE DE LA RETINE

1. Epithélium pigmentaire.
2. Cône.
3. Bâtonnet.
4. Cellule bipolaire.
5. Cellule ganglionnaire.
- 6-7. Cellules d'association.

ce que Helmholtz avait déjà formulé, et cet auteur partant du minimum de l'angle limite qui est de 30 secondes avait calculé que le diamètre d'un cône devait être de l'ordre de 2 microns, ce que l'histologie a vérifié.

« En dehors de la macula, continue Policard, une cellule ganglionnaire, donc une fibre optique correspond à plusieurs cellules bipolaires et chacune de celles-ci à plusieurs cônes ou bâtonnets. Il y a ici concentration des excitations sur un seul neurone ganglionnaire. La concentration est d'autant plus considérable que la rétine est fonctionnellement moins parfaite. Tandis qu'au niveau de la macula, une cellule ganglionnaire correspond à un cône, sur le reste de la rétine, on a une cellule ganglionnaire pour 5 ou 10 bipolaires, cette unique cellule correspond en fin de compte à environ 100 ou 200 cellules visuelles ; la concentration des excitations est donc très accentuée, ce qui est très probablement en rapport avec la faiblesse des excitations à la périphérie de la rétine.

« Au lieu d'envisager le nombre des cônes et des bâtonnets en rapport avec une cellule ganglionnaire, on peut calculer la surface rétinienne en rapport avec une cellule ganglionnaire. Une fibre nerveuse correspond à une surface de 20 microns q. au niveau de la macula, et une surface de 1.300 microns q. au niveau de la périphérie. Chez des animaux qui vivent dans des milieux peu éclairés, la surface correspondant à 1 cellule ganglionnaire est très élevée, 13.500 microns q. chez le Phoque, 76.200 microns q. chez le Balénoptère ; on conçoit ici la nécessité de la concentration des excitations».

Ces faits expliquent admirablement la haute valeur

du sens des formes pour la vision maculaire et son absence à peu près complète pour la vision périphérique, malgré une bonne sensibilité à la lumière. C'est qu'à ce niveau une fibre nerveuse correspond à une grande surface rétinienne qui constitue, selon le terme de Broca un territoire indépendant où il y a sommation indifférente des excitations. Ce territoire se comporte, au point de vue du sens des formes, exactement comme un seul cône dans la vision maculaire. Pour que deux objets soient séparés par l'œil, il faut que leurs images laissent entre elles un territoire au moins non impressionné, de ce fait l'angle limite se trouve considérablement agrandi.

L'ADAPTATION

Bien des points restent encore obscurs dans le mécanisme de l'adaptation, néanmoins, nous allons voir que, là aussi, l'histologie et la physiologie ont permis de formuler un certain nombre d'hypothèses intéressantes.

A l'heure actuelle, on connaît trois phénomènes élémentaires de l'adaptation, le premier est de nature surtout chimique, le second de nature surtout physique et le dernier de nature surtout physiologique.

a). — *Processus chimique.*

On sait qu'il existe au niveau de l'article externe des bâtonnets un pigment rouge, l'érythropsine ou pourpre rétinien. Cette substance que l'on peut extraire facilement au moyen d'une solution de sels biliaires

(glycocolate Na) qui augmentent sa solubilité, a la remarquable propriété de se décolorer à la lumière et de se recolorer à l'obscurité.

Les chimistes ont maintenant établi que ce pigment est de nature protéique. Ce serait une hétéroprotéine ayant pour groupement prosthétique un caroténoïde voisin de la vitamine A, le rétinène. Sous l'action de la lumière, le pourpre rétinien subit une hydrolyse qui détache le rétinène de son support protéique; on obtient alors une substance peu colorée, le jaune rétinien. Si l'on reporte à l'obscurité le rétinène est à nouveau fixé sur la molécule protéique et régénère le pourpre rétinien.

En réalité les deux réactions se font en même temps et tendent vers un certain équilibre. C'est là une loi générale qui s'applique à toutes les réactions chimiques quand aucun des constituants ne s'élimine du champ de la réaction.

L'équilibre final est atteint lorsque les vitesses de deux réactions deviennent égales. Ces vitesses dépendent de nombreux facteurs dont les principaux sont la concentration des corps en présence, la température et, pour le cas qui nous intéresse, l'apport d'énergie lumineuse. Comme la température de l'œil est constante, l'équilibre dépendra surtout de la quantité de lumière reçue et de l'intensité des échanges circulatoires.

Cette réaction photochimique est connue depuis longtemps. En 1876, Frantz Boll, avec certaines précautions avait pu obtenir de véritables photographies (optogrammes) des objets extérieurs. Il prenait des lapins ayant séjourné un certain temps dans l'obscurité et les

plaçait en face d'une fenêtre, en pleine lumière. Au bout de quelques instants il séparait l'œil et le disséquait rapidement à la lumière de l'alcool salé. En reportant la rétine à la lumière du jour, il voyait sur cette membrane l'image de la fenêtre reproduite en positif. Aux parties éclairées de la fenêtre correspondaient des parties décolorées de la rétine et seuls les barreaux sombres apparaissaient en rouge sur la rétine. En laissant agir la lumière, l'image s'effaçait assez vite et toute la rétine se décolorait.

Au premier abord, de telles constatations sont assez impressionnantes et on pourrait être tenté de voir dans cette réaction photochimique l'origine même de l'excitation lumineuse. En réalité, on ne peut pas s'attarder à une telle hypothèse, car ces formations d'images et leur disparition demandent un temps qui n'est pas négligeable et non compatible avec la grande rapidité des sensations lumineuses.

En étudiant le pourpre chez les différentes espèces animales on a vu qu'il était surtout abondant chez les animaux à activité nocturne. On a alors pensé que ce n'était pas la substance photosensible, au sens physiologique, mais une substance sensibilisante qui agirait sur les cellules sensorielles. L'action du pourpre peut ainsi se rapprocher de celle des transmetteurs chimiques dont le rôle sur les éléments nerveux et musculaire a été démontré par Loewi et H. Dale. On sait maintenant que ces substances provoquent des variations de l'excitabilité des cellules en modifiant leur potentiel de repos. Une augmentation du potentiel de repos correspond toujours à une baisse de l'excitabilité et inversement,

une diminution du potentiel de repos entraîne un accroissement de l'excitabilité.

Quel que soit son mode d'action, il semble bien établi que le pourpre rétinien est une substance sensibilisante dont le rôle est de modifier l'excitabilité des cellules sensorielles et de la proportionner à la grandeur de l'excitant. Lorsque la rétine reçoit beaucoup de lumière, l'équilibre chimique est rompu, une certaine quantité de pourpre est détruite et la sensibilité diminue. Si, au contraire, la lumière baisse ou devient nulle, le taux du pourpre s'élève et tend vers un nouvel équilibre, la sensibilité est alors maxima.

Il est intéressant de noter que la carence en vitamine A s'accompagne d'héméralopie, ce qui semble prouver que le rétinène se forme au dépens de la vitamine A apportée par les vaisseaux de la choroïde. A l'état normal, les dosages ont révélé des quantités très élevées de vitamines A dans la rétine, la couche pigmentaire en contient encore davantage (rétine de mammifère 0,022 mg. par gramme de matière sèche, rétine de grenouille 0,4 mg., couche pigmentaire de grenouille 2 mg.) (1).

Chez les sujets carencés, ce taux diminue, et par conséquent les quantités de rétinène et de pourpre formés ne peuvent plus atteindre une valeur suffisante pour permettre la perception des faibles lumières. Il suffit de redonner à ces malades de la vitamine A pour faire disparaître le trouble.

(1) K. David, E. Dingemanse, J. Freud et E. Laqueur. *Z. physiol. chem.* t. 233, p. 281.

D'autres vitamines comme la lactoflavine et l'acide ascorbique interviendraient également dans les phénomènes de vision, leur mode d'action est encore à l'étude.

b). — *Processus physique.*

Ce second processus de l'adaptation consiste dans les mouvements des prolongements de l'épithélium choroïdien, entre les bâtonnets et les cônes. Cet épithélium est formé d'une couche unique de cellules hexagonales renfermant un pigment d'un noir intense, la fuscine de Kühne. Le pôle interne de ces cellules envoie des expansions protoplasmiques qui forment de véritables manchons autour des cônes et des bâtonnets. Ces cellules réagissent à la lumière de deux façons : 1° par des mouvements de leurs prolongements qui descendent plus bas et entourent plus étroitement les éléments sensoriels ; 2° par une migration du pigment qui vient s'accumuler dans les prolongements protoplasmiques.

Ces modifications se constatent facilement en comparant, par exemple, deux coupes de rétine de grenouille, l'une des préparations étant fixée après séjour à l'obscurité, l'autre après exposition à une vive lumière.

D'ailleurs, ce phénomène pouvait se prévoir par analogie, la motricité est, en effet, une propriété très générale des cellules à pigment. Les mélanophores des revêtements cutanés sont tout à fait comparables aux cellules de l'épithélium choroïdien et sont doués, comme elles, de mouvements propres.

On peut suivre très facilement leurs modifications en examinant au microscope une écaille de poisson ou la membrane interdigitale d'une grenouille. Si on place une goutte d'adrénaline sur la préparation, tous les mélanophores se rétractent, une goutte d'extrait hypophysaire provoquera au contraire leur étalement.

Le phénomène peut encore s'observer macroscopiquement. Pour cela il suffit de placer l'animal (grenouille ou certains poissons) à l'obscurité, on constate qu'il prend une teinte plus foncée, due à l'étalement des mélanophores, si on le reporte à la lumière, les mélanophores se rétractent et les téguments reprennent leur teinte primitive.

Il ne s'agit pas là d'une action directe de la lumière sur les cellules pigmentaires, mais bien d'un véritable réflexe visuel. Autrement dit ce n'est pas l'éclairement des téguments qui intervient, mais la brillance du fond sur lequel repose l'animal.

Après section des nerfs optiques, ce curieux phénomène d'adaptation au fond disparaît. Son mécanisme est de nature neuro-humorale, il fait intervenir des glandes endocrines, surrénales, hypophyse et même dans certaines circonstances, les glandes génitales.

Bien que les modifications soient ici inverses de celles de l'épithélium de la choroïde, il nous a cependant paru intéressant de faire ce rapprochement car, dans les deux cas, il s'agit bien d'une réaction à une excitation visuelle.

Retournons maintenant à la rétine, et voyons quel rôle joue l'épithélium pigmentaire dans les phénomènes de vision.

Nous avons dit que, sous l'action de la lumière, les manchons opaques vont descendre le long des cellules visuelles qui seront, en quelque sorte, étranglées par l'accumulation du pigment. Leur surface excitable, ou mieux leur section droite, se trouve ainsi réduite et il s'établit entre elles des cloisons opaques qui absorbent la lumière et empêchent sa diffusion. Une première conséquence sera d'éviter une excitation trop forte des cellules lorsque la quantité de lumière augmente. De plus, au niveau de la macula, où chaque territoire se réduit à un cône, il y aura un retentissement sur le sens des formes.

En effet, d'après les idées d'Helmholtz et de Broca, les meilleures conditions se trouvent réunies pour que l'on ait une bonne acuité. La surface du territoire est réduite et l'indépendance stricte des éléments est assurée par l'interposition d'écrans opaques.

Dans cette hypothèse, Broca a pu calculer que, lorsque l'acuité passe de 1 à 1,5, l'épaisseur de pigment migré entre les cellules est de 1 micron environ.

Sur le reste de la rétine, les conditions ne sont pas tout à fait les mêmes. Les territoires indépendants se composent d'un très grand nombre de cellules visuelles. La déduction de la surface excitable de chacune d'elles diminuera bien, dans la même proportion, l'excitabilité du territoire tout entier, mais elle affectera très peu la surface même de ce territoire puisque seules les cellules périphériques interviendront. Egalement, les phénomènes de diffusion qui peuvent exister à la périphérie sont de trop peu d'importance, par rapport à la quantité de lumière reçue par le territoire, pour qu'on puisse en tenir compte.

Nous dirons donc que les mouvements des cellules pigmentaires de la choroïde ont surtout pour but de modifier la sensibilité lumineuse de la rétine dans son ensemble. Ils expliquent en partie les modifications de l'acuité visuelle, mais on voit facilement que, par ce seul mécanisme, les variations se feraient dans des proportions assez faibles et qui seraient exactement celles dans lesquelles varie la section droite des cônes. Pour comprendre les grandes modifications que subit l'acuité visuelle pour les basses lumières, il faut faire intervenir une autre hypothèse, dûe à Broca, et qui constitue le troisième processus connu de l'adaptation.

c). — *Processus physiologique.*

Ramon y Cajal a montré dans la rétine l'existence de cellules d'association permettant d'établir, suivant sa propre expression, des connexions horizontales qui mettent en relation un certain nombre de cellules appartenant à une même couche.

Ces cellules d'association sont de deux types et on les rencontre à des étages différents de la rétine: Ce sont :

— Les cellules horizontales multipolaires, logées dans la couche plexiforme interne, leurs dendrites s'articulent avec les ramifications des cellules visuelles, et leur axone, plus ou moins allongé, va s'articuler à une certaine distance avec une cellule bipolaire ;

— Les cellules unipolaires ou spongioblastes, elles ont leur corps cellulaire dans la couche des grains internes, elles ne possèdent qu'un seul prolongement en

bouquet qui met en relation un groupe de cellules bipolaires avec une cellule ganglionnaire.

Broca partant de ces constatations a admis que les connexions horizontales ne sont pas fixes mais sont susceptibles de se produire de manières différentes suivant les circonstances.

Ainsi lorsque la quantité de lumière reçue par un territoire indépendant est trop faible pour produire une excitation, plusieurs territoires seront groupés « en batterie » grâce aux cellules d'association et concentreront les excitations sur un seul neurone. Il en résultera un agrandissement du territoire indépendant avec conservation de sa propriété fondamentale, la sommation indifférente des excitations.

Il n'existe pas de vérification directe de cette hypothèse, mais Broca a donné comme argument des expériences de Charpentier qui justifient assez bien cette façon de voir. Charpentier, en effet, a montré que la brillance correspondant au seuil de la sensation est constante pour les plages de dimensions suffisantes et qu'elle devient inversement proportionnelle à la surface quand celle-ci est vue sous un diamètre apparent inférieur à $1/100^e$.

Or, lorsqu'on atteint cette limite, l'image rétinienne couvre à peu près toute la macula. Broca pensait qu'à ce moment, pour des lumières très faibles, tous les cônes sont en batterie de façon à diriger vers une seule cellule centrale toute l'énergie nerveuse produite sur la fovea. Lorsque la surface de l'image rétinienne diminue, il faut que son éclairement augmente pour produire la même excitation nerveuse. Au contraire, si on

vient à augmenter l'éclairement sans changer les dimensions de la plage lumineuse, les excitations de chaque cône seront de plus en plus grandes, la fovea va alors se scinder en territoires indépendants de plus en plus petits. Enfin, quand l'excitation reçue par chaque cône est suffisante pour ébranler une cellule centrale, le territoire indépendant est réduit au minimum. A partir de ce moment, une augmentation de l'éclairement ne devrait plus modifier l'acuité visuelle, mais c'est alors que va intervenir un autre phénomène, la migration du pigment que nous avons déjà étudiée.

Broca a également fait remarquer que l'on peut retrouver sur la courbe d'acuité la traduction de ces deux phénomènes successifs. Au-dessous d'un éclairement de 10 lux sur papier blanc, les variations de la courbe sont extrêmement rapides, indiquant qu'il se passe quelque chose d'important : la modification des connexions horizontales. Pour les éclairéments supérieurs à 10 lux, les variations deviennent, au contraire, très lentes, elles seraient alors dûes uniquement à la migration du pigment.

A l'époque de Broca, on ne pouvait expliquer ces variations dans les connexions nerveuses que par des modifications des rapports anatomiques des cellules grâce à des mouvements de leurs dendrites ou de leur axone. Or, malgré les perfectionnements de la technique histologique, de tels mouvements n'ont jamais pu être mis en évidence et sont d'ailleurs difficiles à concevoir de la part de cellules nerveuses.

Les acquisitions récentes sur la physiologie du système nerveux ont permis d'établir une théorie générale

de la transmission synaptique où n'intervient aucune modification des connexions anatomiques. L'aiguillage de l'influx nerveux sur tel ou tel neurone se fait uniquement par un mécanisme physiologique qui ne dépend que de la qualité même de l'influx.

Cette théorie repose sur des expériences d'excitation sélective des nerfs (Wyss). Dans ces expériences, l'excitation est produite non par un courant continu rectangulaire, mais par une onde électrique particulière que l'on pourrait qualifier de physiologie. Cette onde s'obtient par le couplage de deux condensateurs. L'un des condensateurs C^1 est chargé à un certain potentiel V , et, au moment où l'on ferme le circuit d'excitation, le deuxième condensateur C^2 reçoit la décharge du premier.

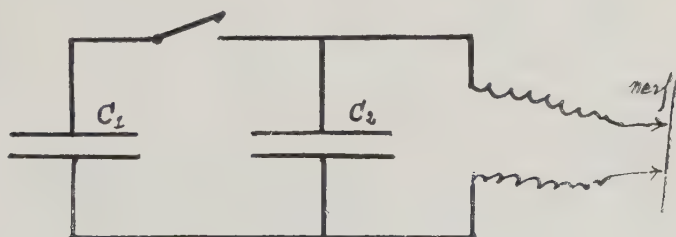


fig. 4

En choisissant convenablement la capacité des 2 condensateurs, on peut obtenir une onde électrique qui reproduit assez fidèlement celle du courant d'action d'un nerf tel qu'on l'enregistre à l'oscillographe cathodique ; c'est-à-dire que l'on a une onde dont la phase ascendante est environ la moitié de la phase descendante.

Si, avec un tel courant, on excite séparément deux préparations nerf-muscle, on peut tracer pour chacune d'elles une courbe indiquant, en fonction du voltage initial de C^1 , la durée que doit avoir la phase ascendante pour obtenir une excitation liminaire. On constate que les courbes ainsi obtenues présentent un minimum pour une durée de la phase ascendante égale à huit ou dix fois la chronaxie.

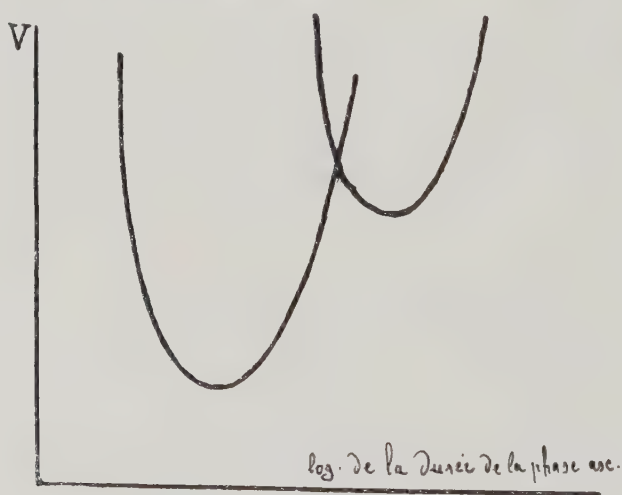


fig. 5

Si les deux nerfs ont des chronaxies différentes, les deux courbes ne seront pas superposées. Si on excite maintenant en parallèle les deux préparations, le simple examen du graphique montre qu'en choisissant convenablement les caractéristiques du courant, on pourra obtenir, à volonté, une réponse de l'une ou de l'autre des préparations ou bien encore des deux à la fois.

Rien ne s'oppose à admettre un tel mécanisme au niveau de la rétine. On peut très bien imaginer qu'une

faible excitation lumineuse détermine sur les cônes et les bâtonnets la production d'un courant d'action inapte à exciter le neurone bipolaire correspondant, mais capable d'exciter les ramifications dendritiques d'une cellule d'association. Celle-ci, par sommation des excitations, pourra alors exciter une cellule bipolaire. Au contraire, lorsque l'excitation lumineuse est plus forte, le courant d'action qu'elle engendre sur les cellules sensorielles devient capable d'exciter directement les neurones bipolaires, sans passer par l'intermédiaire des cellules d'association. Le même mécanisme est applicable aux cellules amacrines pour la concentration et la transmission de l'influx entre les neurones bipolaires et les neurones ganglionnaires.

Envisagées de cette façon, les modifications des connexions nerveuses deviennent instantanées. Le temps considérable que demande le passage d'un état d'adaptation à un autre est alors dû uniquement aux deux autres processus : la migration du pigment et les modifications photo-chimiques. Ce sont en effet ces deux processus qui sont en grande partie responsables d'une sorte d'inertie de la sensibilité. Il en résulte que, lorsque l'excitant varie d'une façon rapide, la sensibilité de la rétine ne peut suivre ces variations qu'avec un certain retard. Ce déséquilibre entre l'excitant et la sensibilité est l'origine de perturbations visuelles qui constituent l'éblouissement.

L'ÉBLOUISSEMENT

Le mot éblouissement évoque dans l'esprit de chacun un phénomène bien connu. Tout le monde sait, par exemple, qu'il est impossible de regarder directement le soleil sans éprouver une sensation très pénible et une gêne plus ou moins durable dans les instants qui suivent. C'est ce que l'on traduit vulgairement en disant que le soleil a un éclat aveuglant. Mais, si l'on consulte la littérature scientifique, on constate qu'il est très difficile de trouver une définition précise de l'éblouissement.

« L'éblouissement visuel, dit le Docteur Couvreur, est certainement un des problèmes les plus importants que pose la science de l'éclairage, c'est aussi l'un des plus complexes, car son étude se rattache à la connaissance de la nature intime de nos sensations, connaissances qui, aujourd'hui, nous échappe encore à peu près complètement ».

« Bien que nous ayons une notion parfaitement nette de ce qu'est l'éblouissement, il n'est pas possible d'en donner a priori une définition précise, pas plus qu'il n'est possible de définir la douleur, par exemple. C'est, disent les physiologistes, une sensation désagréable, pénible ou douloureuse, suivant son intensité et qui fait qu'on dit: Je suis ébloui ; elle est due à une distribution défectueuse ou à une valeur excessive des brillances dans le champ visuel et semble s'accompagner toujours de troubles de la vision ».

Dans une communication à l'Académie des Sciences (4 mai 1931), le Docteur Emile Haas donne la définition suivante que nous adopterons :

« L'éblouissement est l'ensemble des désordres occasionnés dans l'appareil visuel par l'excès ou par la mauvaise répartition du flux lumineux au niveau de la rétine, pour un état donné d'adaptation du fond. »

Cette définition a l'avantage de faire intervenir l'état d'adaptation de la rétine, et l'on conçoit difficilement qu'il puisse en être autrement : telle lumière qui est éblouissante pour une personne ayant séjourné dans une pièce obscure n'incommodera nullement une personne venant du grand jour.

Dans l'étude de l'éblouissement, M. Haas distingue deux stades successifs. Le premier est extrêmement court, il provoque les défenses organiques et notamment la constriction pupillaire. Le second stade lui succède aussitôt, il reste à peu près permanent tant que rien ne change dans la valeur ni dans la répartition du flux éblouissant. C'est la période d'état de l'éblouissement.

Il est bien évident que la seule grandeur photométrique qui intervient dans l'excitation des cellules visuelles est l'éclairement des images rétinienne. Cet éclairement est proportionnel à la brillance de l'objet et à la surface de la pupille, il est donné par la formule

$$E = \frac{B S}{f^2}$$

(B brillance de l'objet considéré, S ouverture surfacique de la pupille, f distance focale image, n indice du vitré par rapport à l'air).

La constriction pupillaire aura donc pour effet de diminuer les excitations de la rétine et éviter son épuise-

sement rapide. Son intensité mesurera la souffrance de l'organe.

C'est en utilisant la constriction pupillaire que Broca a autrefois déterminé la valeur des différentes sources, au point de vue de l'hygiène de l'œil. Ce savant était arrivé à la conclusion suivante : la constriction ne dépend que de la brillance de la source, elle n'est pas influencée par la distance de la source ni sa position dans le champ.

Plus tard, en 1924, J. Couvreur a étudié les réactions photomotrices avec des plages éblouissantes de grandes dimensions. Il a vu que, pour les plages dont le diamètre apparent dépasse $5/100^e$, la constriction dépend uniquement de la brillance et non de la surface. Mais, au-dessous de $5/100^e$, la constriction pupillaire diminue de plus en plus rapidement avec la surface rétinienne éclairée.

Enfin, il a constaté que lorsque la droite joignant l'œil à la source forme un angle avec l'axe de l'œil supérieur à 45 degrés, la constriction pupillaire est moins intense que lorsque la source est située dans la région centrale de champ.

Quoiqu'il en soit, retenons que, lorsqu'une source de brillance élevée se trouve dans le champ, quelle que soit sa distance ou sa position, la pupille va réagir par une contraction qui témoigne d'une souffrance de l'œil.

Nous avons maintenant atteint le deuxième stade de l'éblouissement qui constitue la période d'état. Les troubles visuels qui l'accompagnent sont dûs à des excitations inhibitrices qui ont pour point de départ les régions suréclairées et qui se propagent au reste de la rétine.

Il ne s'agit pas certainement d'une destruction du pourpre rétinien puisque l'éclairement de la rétine a diminué. Il semble plutôt que l'on ait à faire à une réaction de l'épithélium de la choroïde qui déborde largement les limites de l'image éblouissante. Cela n'exclut d'ailleurs pas l'intervention possible d'autres réactions d'inhibition qui nous sont encore totalement inconnues.

La distinction que font parfois les éclairagistes entre l'éblouissement direct par les sources et l'éblouissement indirect par réflexion ne présente pas plus d'intérêt au point de vue physiologique que la distinction entre sources primaires et sources secondaires. Ce qui importe, pour M. Haas, c'est la distinction fondamentale entre l'éblouissement simultané et l'éblouissement successif.

— *L'éblouissement est dit simultané* lorsqu'il existe dans le champ visuel une plage dont la brillance excède largement la brillance moyenne du fond (filament d'une lampe à incandescence par exemple).

Lorsque la différence de brillance est très marquée, la gêne que l'on éprouve au début ne tarde pas à se transformer en fatigue qui, à la longue, devient intolérable. Mais il est de nombreuses circonstances où l'on souffre d'éblouissement sans s'en rendre toujours compte. C'est ce qui arrive, par exemple, lorsqu'une source très brillante est à une certaine distance de l'œil ou occupe une position très angulaire dans le champ.

Dans une conférence faite au conservatoire national des Arts-et-Métiers, R. de Valbreuse cite une expérience qui, à ce point de vue, est très démonstrative.

« Supposez que vous lisiez dans un fauteuil ou dans votre lit en tenant votre livre incliné, et qu'une lampe, placée sur une table en face de vous, assez loin de vous, se trouve allumée. Vous ne vous en apercevez pas et n'y prêtez aucune attention : vous n'avez pas le sentiment que cette lampe vous incommode. Or, si quelqu'un vient à l'éteindre, vous éprouverez exactement la même sensation que si l'on venait d'allumer derrière vous une lampe supplémentaire éclairant votre livre. Inversement, si l'on rallume la lampe de la table, il vous semblera que l'on vient d'éteindre la lampe supplémentaire qui éclairait votre livre et vous aurez le sentiment de ne plus y voir suffisamment clair ».

L'explication de ces faits est simple lorsque l'on sait que le facteur fondamental de la vision est l'éclairement des images rétinienne qui dépend lui-même de l'ouverture de la pupille.

Si, par exemple, le rayon de la pupille passe de 2 mm. à 3 mm. lorsqu'on supprime la lampe éblouissante, l'éclairement des images rétinienne variera dans un rapport de 4 à 9. Non seulement la lampe supplémentaire n'augmentait pas la brillance du plan utile, mais elle entraînerait une perte de plus de la moitié dans l'utilisation de la lumière par l'œil.

— *L'éblouissement est dit successif* lorsque l'œil considère successivement deux objets de brillance trop différente, même lorsque la brillance d'aucun d'eux n'est en elle-même excessive.

C'est ce qui arrive lorsque la rétine est adaptée à la brillance du plan de travail et que le regard rencontre de temps en temps le filament d'une lampe ou tout au-

tre objet de brillance plus élevée. Il en résulte une désadaptation aiguë au niveau de l'image rétinienne éblouissante, et lorsque le regard retourne au plan de travail, l'observateur aperçoit une tache sombre qui correspond à la source préalablement observée. C'est une image accidentelle négative sur un fond clair. Sa formation est due au fait que la portion de la rétine qui lui correspond reste pendant un certain temps en état d'hyposensibilité par rapport aux régions avoisinantes.

Réciproquement, on conçoit que si l'on fixe pendant un certain temps une surface noire sur un fond très clair et si l'on regarde ensuite un papier noir, on y puisse voir une image accidentelle claire sur fond obscur résultant d'une hypersensibilité de la rétine.

Cette autre forme d'éblouissement successif se rencontre assez souvent dans l'industrie lorsque, pour des raisons d'économie mal comprise, on éclaire seulement les machines sur lesquelles travaillent les ouvriers et qu'on laisse les autres régions de l'atelier dans une obscurité relative. Ces conditions sont extrêmement défavorables pour l'ouvrier. Le travail, parfois complexe qu'il doit accomplir, peut l'obliger à porter alternativement le regard du plan éclairé de la machine au fond obscur de l'atelier. L'œil est ainsi soumis à des variations de brillance qui à la longue deviennent extrêmement pénibles.

Cet éclairage défectueux et les troubles visuels qui en résultent, peuvent être à l'origine de graves accidents, comme il en arrive fréquemment lorsque l'ouvrier porte sa main du plan de travail bien éclairé

vers un recoin de la machine mal éclairé où peuvent se trouver des engrenages ou autres organes dangereux.

Dans un article, paru dans les Annales d'Hygiène, de juillet 1925, l'Inspecteur du travail L. Bargeron, signale que 18 % au moins des accidents industriels peuvent être attribués à un mauvais éclairage.

L'éblouissement, sous toutes ses formes, est certainement la cause la plus importante de la fatigue oculaire. Sous l'effet d'un éclairage éblouissant, la rétine se trouve constamment soumise à des excitations disproportionnées à sa sensibilité. Le surmenage qui résulte des modifications continuelles de l'état d'adaptation ne tarde pas à aboutir à une fatigue des fonctions de régulation. L'activité de l'épithélium de la choroïde se trouve considérablement ralentie, c'est-à-dire qu'il faut un temps relativement plus long que chez les personnes normales pour s'habituer à un éclairage donné. Le pigment descendu le long des cônes et des bâtonnets pour les protéger des radiations trop intenses, ne remonte plus qu'extrêmement lentement ; lorsque l'éclairage diminue, on observe ainsi un certain degré d'héméralopie. Enfin, dans les cas d'éblouissement très intense, il peut même y avoir des lésions de la choroïde et de la rétine.

La symptomatologie de la fatigue oculaire est bien connue. Elle consiste surtout en modifications des réflexes de défense. Il y a d'abord une période d'exagération de l'excitabilité des réflexes palpébraux avec augmentation du nombre des clignements, puis surviennent de petites contractions cloniques de l'orbiculaire et du blépharospasme. A ce stade, il y a, en général, une parésie du réflexe pupillaire avec spasme de l'iris.

En ce qui concerne la partie sensitive, on peut observer de la photophobie, une démangeaison et des douleurs orbitaires.

Lorsque la fatigue se prolonge, des troubles vasomoteurs vont apparaître et se traduiront par de l'œdème et une pigmentation spéciale des paupières (yeux cernés).

Au point de vue de l'hygiène de l'œil, il est donc de la plus haute importance que l'éblouissement soit réduit au minimum. Pratiquement nous pouvons donner les indications suivantes : l'éclairage d'un local est d'autant plus éblouissant :

- que la source lumineuse a une brillance plus élevée,

- que cette source est située plus près de l'œil ou plus près de l'axe de vision,

- que, pour une brillance donnée, et une position déterminée de la source, celle-ci produit un flux lumineux plus grand,

- que le contraste est plus prononcé entre la brillance de la source et celle du fond sur lequel elle se détache.

Il est donc nécessaire :

- de réduire la brillance des sources au moyen d'enveloppes diffusantes,

- de masquer ces sources par des dispositifs appropriés,

- de placer les appareils d'éclairage loin de l'œil et, le plus possible, hors du champ visuel correspondant aux travaux habituels,

— de réduire les contrastes entre les foyers lumineux et le fond sur lequel ils se détachent et pour cela, chaque fois que ce sera possible, utiliser sur les murs plafonds, etc..., des revêtements suffisamment clairs pour que la brillance soit relativement élevée.

ECLAIREMENT DU PLAN DE TRAVAIL

En étudiant les fonctions élémentaires de la rétine, nous avons vu que l'acuité visuelle est fonction de la brillance du fond observé. Comme l'acuité est la fonction rétinienne qui intervient le plus dans l'exécution d'un travail, il semblerait logique de dire qu'il suffit d'avoir un éclairement de l'ouvrage donnant juste l'acuité nécessaire pour ce travail. En réalité, un tel raisonnement serait faux, car il convient de remarquer que, pour un même éclairement, la brillance des objets dépend de leur coefficient de diffusion. Au cours du travail, le regard de l'ouvrier n'est pas fixe, il se porte successivement sur divers points de l'ouvrage ou de la machine qui peuvent diffuser très inégalement la lumière. L'ouvrage lui-même peut changer. C'est ainsi qu'un éclairement suffisant pour coudre sur une étoffe claire, deviendra nettement insuffisant pour coudre sur une étoffe foncée. Il faut donc que l'éclairage soit assez intense pour donner sur toute la surface utile et dans toutes les circonstances, une brillance suffisante pour la bonne exécution du travail.

D'ailleurs, il y a non seulement des raisons physiques, mais des raisons physiologiques pour employer des éclairements bien supérieurs à la limite. Une loi très générale de la physiologie, dit qu'un organe ne travaille aux environs de sa limite qu'au prix d'une fatigue insoutenable.

Broca, Laporte et Jouaust ont montré que si l'on fait lire à un sujet une page de caractères de dimension uniforme, correspondant à l'angle limite, la vitesse de

lecture décroît très rapidement. Cette décroissance de la vitesse de lecture doit être nécessairement considérée comme la traduction d'une fatigue cérébrale qu'il faut différencier de la fatigue par éblouissement qui elle touche surtout la membrane sensible de l'œil.

Dans une expérience, Broca a trouvé les résultats suivants :

Temps de lecture :

1 ^e ligne....	9 secondes
2 ^e ligne....	15 —
3 ^e ligne....	23 —
4 ^e ligne....	30 —
5 ^e ligne....	43 —
6 ^e ligne....	59 —
7 ^e ligne....	arrêt, la fatigue rendant toute lecture impossible.

Ces auteurs ont constaté que, pour être dans de bonnes conditions, il fallait que les caractères soient vus sous un angle égal à 3 ou 4 fois l'angle limite ; dans ces conditions, la dernière ligne était lue sans fatigue à la même vitesse que la première.

Broca en tirait la règle suivante applicable à tous les travaux :

« L'œil sera placé dans les meilleures conditions pratiquement réalisables pour l'exécution d'un ouvrage donné, quand il sera placé à une distance égale au tiers ou au quart de celle qui correspond à la limite de visibilité du détail à distinguer ; l'éclairage devra être calculé en conséquence ».

Comme l'accommodation ne permet pas un bon travail à une distance inférieure à 0,35 m. on voit que la

conclusion pratique est la suivante : un bon éclairage doit permettre la distinction des détails de l'ouvrage à 1,40 m. environ.

Lorsque la vision des détails n'est possible qu'à une distance inférieure, l'œil a tendance à se placer trop près de l'ouvrage. Il est obligé de faire un effort considérable de convergence et d'accommodation qui, à la longue, peut aboutir à la myopie.

Dans des statistiques concernant la myopie des ouvriers, Cramer a relevé une proportion de 69 % de myopes de 0,5 à 9 dioptries et Walter, sur 2.672 ouvriers en a trouvé 611 avec une vision diminuée, dont 224 avec une myopie acquise. Sur ce nombre, 95, c'est-à-dire 15 pour cent des cas étaient dûs à la pratique du métier. La majorité des myopes se rencontre chez les compositeurs typographes, les bijoutiers et les mécaniciens (fine mécanique).

La myopie est surtout à redouter chez les sujets jeunes. Elle est attribuée à un allongement du globe oculaire dû à la pression des muscles extra oculaires pendant la convergence excessive. Cette pression fait tomber le pôle postérieur de l'œil qui est la partie la moins résistante du globe oculaire.

L'acuité visuelle et la rapidité de perception ne sont pas les seuls facteurs dont il faut tenir compte pour la détermination de l'éclairement utile. Dans tout travail industriel, l'ouvrier doit mettre en jeu des fonctions mentales et des fonctions motrices. Il ne suffit pas que la perception visuelle se fasse vite et sans fatigue, il faut encore que la réaction psychomotrice qui va suivre soit rapide.

L'influence de l'éclairage sur la durée des réactions psychomotrices a été étudiée en Allemagne par Walter Ruffer et en France par le Docteur Faillie. Sous la direction de M. Faillie, de nombreuses expériences ont été effectuées au laboratoire de Physiologie du travail du Conservatoire National des Arts et Métiers. Nous résumons ici une de ces expériences.

Un chronoscope de d'Arsonval, composé essentiellement d'une aiguille entraînée à vitesse rigoureusement constante par un moteur synchrone, pouvait être mis en marche par un opérateur au moyen d'un contact électrique et arrêté, au moyen d'un second contact électrique, par le sujet soumis à l'expérience. L'aiguille se déplaçait à raison d'un tour par seconde. Le cadran étant divisé en 100 divisions, le point d'arrêt de l'aiguille indiquait le temps en centièmes de seconde.

L'essai était conduit de la façon suivante : l'aiguille ayant été ramenée au zéro, l'opérateur prévenait le sujet pour que celui-ci concentrât son attention, puis mettait brusquement l'aiguille en marche ; dès que le sujet avait perçu le déplacement de l'aiguille, il devait l'arrêter le plus rapidement possible. Le point où s'arrêtait l'aiguille mesurait la durée de réaction psychomotrice visuelle du sujet.

L'expérience a été répétée un grand nombre de fois sous des éclairagements différents et avec différents sujets. Les résultats ont montré que la durée de réaction psychomotrice décroît très rapidement depuis les éclairagements très faibles jusqu'à 30 lux environ. Au-delà d'éclairagement de 30 lux, la durée de réaction psychomotrice décroît encore, mais très lentement.

Dans d'autres expériences, M. Faillie a étudié l'influence de l'éclairement sur la réaction psychomotrice de sélection, sur la dextérité et sur le coup d'œil. Il a vu qu'aux faibles éclairagements, la moindre augmentation d'éclairement détermine une amélioration importante de la précision dans les mouvements ; aux forts éclairagements, cette amélioration persiste, mais elle est beaucoup moins marquée.

Ces recherches de laboratoires, jointes aux statistiques sur le rendement de la main-d'œuvre, en fonction de l'éclairage, ont permis aux éclairagistes de dresser des tableaux donnant pour les différentes industries, les éclairagements moyens recommandables. D'une façon générale, on peut admettre que l'éclairement doit être compris entre 15 et 30 lux pour de gros travaux, entre 40 et 60 lux pour des travaux exécutés sur des pièces de dimensions moyennes, entre 60 et 90 lux pour les travaux fins, et entre 90 et 200 lux pour les travaux particulièrement minutieux.

Afin de donner une idée approximative de l'état actuel de l'éclairage artificiel dans l'industrie, nous avons cherché à obtenir la valeur réelle de l'éclairement du plan utile dans divers ateliers. Les chiffres que nous reproduisons ci-dessous, ont été relevés par nous-même ou nous ont été communiqués par des ingénieurs éclairagistes. Pour chaque catégorie de travail, nous donnons les valeurs extrêmes et la moyenne des éclairagements mesurés ; nous comparons ensuite ces chiffres, d'une part, avec les éclairagements indiqués dans un rapport du Bureau International du Travail de 1923, et, d'autre part, avec les éclairagements que recommande, actuellement, la Société pour le Perfectionnement de l'Eclairage.

INDUSTRIES		Eclairéments mesurés (en lux) (chiffres extrêmes) (moyenne)		Bureau Inter' du Travail 1923	Société pour le Perfection de l'Eclair.
Ateliers de mécanique	Etablis	30- 85	48	25 à 35	100
	Tours	25- 60	42,5	25 à 35	100
	Forge	17	17	25 à 35	60
	Machines div. .	10- 75	27	25 à 35	100
Blanchisserie		20- 85	52,5		80
Imprimerie		30-220	73,5	35 à 70	100 à 300
Serrurerie		12-125	32	25 à 35	100 à 150
Fonderie (grosses pièces)		25	25	15	60
Fonderie (petites pièces)		35	35	25	100

Il est certain que l'éclairément du plan de travail à lui seul, ne peut suffire pour apprécier la valeur de l'éclairage qui, comme nous l'avons vu, dépend de nombreux autres facteurs. Cependant, l'examen de ce tableau permet de faire quelques constatations intéressantes.

On est d'abord frappé par l'écart extrêmement grand des valeurs de l'éclairage dans une même industrie. Ce sont principalement les petits ateliers, occupant peu d'ouvriers, qui ont le moins bon éclairage. Dans la grande industrie, d'une façon générale, les éclairagements sont plus élevés, surtout pour les ateliers dont l'installation est récente. Cependant, les meilleurs chiffres sont encore bien au-dessous des valeurs que l'on pourrait souhaiter. La moyenne des éclairagements, pour chaque catégorie de travail est comprise, en général, entre le tiers et la moitié des éclairagements que recommande la Société pour le Perfectionnement de l'Eclairage.

Mais, si l'on compare cette moyenne aux valeurs relevées dans le rapport du Bureau International du Travail, on voit qu'un progrès important a été réalisé depuis 1923. On peut donc dire que l'éclairage industriel est actuellement en pleine évolution et que l'on a tendance à employer des éclairagements de plus en plus élevés.

CONCLUSIONS

1° L'importance capitale d'un éclairage rationnel comme facteur de santé et de sécurité de l'ouvrier et de rendement du travail est universellement reconnue. C'est commettre une grave erreur que de demander à des ouvriers de fournir un travail sans avoir déterminé, au préalable, les conditions optima de l'éclairage.

2° Les principes d'un bon éclairage ne peuvent être établis que par une étude physiologique des différentes fonctions visuelles.

Cette étude montre que l'augmentation de l'éclairement du plan de travail, et par conséquent de sa brillance, s'accompagne d'une façon constante :

- d'une amélioration du sens des formes et du sens différentiel ;

- d'une plus grande rapidité de la perception et des réactions psychomotrices visuelles ;

- d'une diminution de fatigue de l'appareil visuel ;

- d'un rendement global du travail meilleur.

Cette étude montre également que l'œil a la faculté d'adapter sa sensibilité à l'éclairage ambiant, mais que toute variation brusque des brillances est extrêmement défavorable pour une bonne utilisation de la lumière et une bonne hygiène de l'œil.

3° Un bon éclairage doit être défini qualitativement et quantitativement.

- Qualitativement, il faut s'efforcer de réduire l'éblouissement par un éclairage général aussi uniforme que possible, ne laissant aucun endroit dans l'obscurité et supprimant les ombres dures et gênantes.

Le choix des sources et leur emplacement est d'une importance primordiale.

Les sources auront leur brillance atténuée par des diffuseurs ; elles seront, le plus possible, placées loin de l'œil et en dehors du champ visuel habituel.

— Quantitativement, nous pouvons dire que toute augmentation de l'éclairement entraîne une amélioration de la vision ; les meilleurs éclairagements seront donc les plus élevés. Dans la pratique, pour déterminer l'éclairement du plan de travail, on se basera surtout :

- sur le coefficient de diffusion de l'ouvrage,
- sur la finesse des détails à distinguer,
- sur la rapidité de vision et la rapidité des réactions motrices nécessaires pour la bonne exécution du travail ou pour la sécurité de l'ouvrier.

4° Les chiffres que nous rapportons montrent que, malgré les grands progrès réalisés au cours de ces 15 dernières années, beaucoup d'ateliers restent encore insuffisamment éclairés. Il est indispensable de faire une bonne éducation des milieux intéressés au problème de l'éclairage et de montrer aux industriels tous les avantages qu'ils peuvent en tirer.

5° Le médecin d'usine peut avoir un rôle très efficace en accordant à l'éclairage des ateliers tout l'intérêt qu'il mérite. Il doit connaître l'acuité nécessaire pour chaque travail et exiger un éclairage correspondant.

Il ne devra pas non plus négliger le facteur œil et il écartera des travaux visuels, par une sélection rigoureuse, tous les ouvriers dont la vision est défectueuse.

6° Il serait souhaitable que les formules vagues de

notre législation actuelle sur l'éclairage fûssent remplacées par un code détaillé, donnant pour chaque catégorie de travail un éclairage minimum légal. Les inspecteurs du travail auraient ainsi la possibilité de signaler les insuffisances d'éclairage et d'obliger les industriels à apporter à leur installation toutes les améliorations nécessaires.

Vu le Doyen :

TIFFENEAU.

Vu le Président de thèse :

TANON

Vu et permis d'imprimer :

le Recteur de l'Académie de Paris :

G. ROUSSY.

BIBLIOGRAPHIE

BARGERON (L.). — Eclairage artificiel dans l'Industrie.
(Annales d'Hygiène, juillet 1925).

BLANC (A.). — Rayonnement. Principes scientifiques de
l'éclairage, Paris 1921.

BLOCH (L.). — Lichttechnik (Oldenbourg, Berlin 1921).

BROCA (André). — Leçons d'optique physiologique, éditées
par la Revue d'Optique théorique et instrumentale, 3 et
5, boulevard Pasteur, Paris.

— « Sur le fonctionnement de l'appareil nerveux visuel.
Association française pour l'avancement des Sciences.
Congrès de Caen, 1894 », Ed. au Secrétariat de l'Asso-
ciation, 28, rue Serpente, Paris.

— « Mesure et utilisation de la lumière », in Traité de
physique biologique, T. II, Masson éd.

— « Sur la vision des signaux colorés et les épreuves de
la perception colorée », Annales d'occulistique, 65^e an-
née, T. cxxvii, 4^e livraison, O. Douin, éd.

— « Hygiène de la vision. Congrès d'hygiène industrielle
de Bruxelles », Bruxelles, 10-14 sept. 1910.

— « Sur la segmentation rétinienne », Extrait du livre ju-
biliaire du Professeur Ch. Richet, 1912, p. 39.

— « Un pupillomètre permettant la mesure de la pupille
en lumière dosée ». Comptes rendus de l'Académie des
Sciences, 1924, p. 415.

— « Etudes des principales sources de lumière au point
de vue de l'hygiène de l'œil », Annales d'occulistique,
avril 1914.

BROCA (André) et LAPORTE. — « Etude des principales sources de lumière au point de vue de l'hygiène de l'œil », Bulletin de la Société internationale des électriciens, 2^e série, T. VIII, n° 76, 1908.

BROCA (André) et POLACK. — « Vision de petites sources lumineuses colorées. Application à la reconnaissance des feux réglementaires de la marine. » J. de physiologie et de Pathologie générales, n° 1, janvier 1908.

CHARPENTIER. — La lumière et les couleurs, Baillière et fils, 1886.

— Perception lumineuse. Adaptation. (Société des Sciences de Nancy, 15 mai 1885).

COUVREUX (J.). — La constriction pupillaire normale, Thèse Paris 1924.

— « L'éblouissement visuel », Bulletin de la Société Française des Electriciens, n° 60, août 1926.

DARMOIS (E.). — « L'éclairage. Solutions modernes des problèmes d'éclairage industriel », Encyclopédie Léauté (2^e série). Gauthier-Villars et Cie, 55, quai des Grands-Augustins, et Masson et Cie, 120, boulevard St-Germain, Paris, 1923.

DOURGNON (J.) et WAGUET (P.). — « Définition et mesure de l'éblouissement », Commission internationale de l'éclairage, 8^{me} session, septembre 1931.

ESCHER-DESRIVIERES et JONNARD (R.). — L'éblouissement, Hermann et Cie, éditeurs, Paris 1937.

FABRY (Charles). — « Leçons de photométrie, professées à l'Institut d'optique, en 1924 », Editées par la Revue d'optique théorique et instrumentale, 3 et 5, boulevard Pasteur, Paris (15°).

FAILLIE (R.). — Influence de l'éclairage sur le rendement Lux, la Revue de l'éclairage, mai 1928.

GASTER et DOWN. — Modern illuminants and illuminating engineering (Pitman, Londres).

GROS (B.). — L'éblouissement rétinien. Thèse, Paris 1932.

HAAS (Emile). — « Présentation d'un photomètre spécialement approprié à l'étude de l'acuité visuelle aux basses lumières », Société d'ophtalmologie de Paris. Bulletin n° 3 (mars 1931), page 164.

— Etendue sur laquelle est altérée l'acuité visuelle centrale lorsqu'un objet très brillant est contigu au test à définir », Comptes rendus de l'Académie des Sciences, T. CXCII, n° 20, p. 1281, Séance du 4 mai 1931.

— « Observations à propos de la communication de M. Faillie », Réunions de l'Institut d'optique (5^{me} réunion, 8 mai 1931).

— « L'éclairage et la physiologie », Journal L'Architecture, supplément technique, n° 3 et 4 (15 novembre 1928). Edit. 8, rue Danton, Paris).

HAAS (E.) et COUVREUX (J.). — L'acuité visuelle aux basses lumières. Congrès de la Société d'Ophtalmologie, Paris 1928. Bulletin et mémoires de la Société Masson, édit., T. XL, p. 123.

KÖENIG et BRODHUN. — Influence de l'éclairage sur la sensibilité différentielle. Sitzungsber d. Akad. d. Wiss. Berlin, 8, 11, 1917.

MACE DE LEPINAY et NICATI. — Recherche sur la comparaison photométrique des diverses parties d'un même spectre. Ann. de Chimie et de Physique, 5^{me} série, T. xxiv.

RUFFER W — Essai sur la sûreté de main et la vitesse de travail en fonction de l'éclairage. Lichttechnik, 26 avril 1925.

TSCHERNING. — Optique physiologique, Carré et Naud, éditeurs 1898.

